



انجمن علوم خاک ایران



موسسه تحقیقات خاک و آب

نشریه علمی

# پژوهش‌های خاک

(علوم خاک و آب)

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

ISSN: 2228 -7124

الف / جلد ۳۹ / شماره ۳ سال ۱۴۰۴

فهرست مقالات

۲۴۷.....شناخت وضعیت شوری خاک باغ‌ها انار ساوه.....محمدعلی خودشناس و جواد قدبیک‌لو

۲۶۳.....پویایی و توزیع شکل‌های مختلف فسفر و پتاسیم در خاک اطراف ریشه ذرت و سیب‌زمینی در اثر کودآبیاری با سیستم آبیاری قطره‌ای.....میشم رضائی، مصطفی مارزی، کامبیز بازرگان، کریم شهبازی و میثم چراغی

۲۸۷.....پویایی پتاسیم خاک و ارتباط آن با کانی‌شناسی رس‌ها در خاک‌های زراعی دشت دامنه‌ای شهرکرد.....مرضیه براتی زانیانی، علیرضا حسین‌پور، محمدحسن صالحی و اعظم جعفری

۳۰۳.....تأثیر رطوبت بر اکسایش گوگرد و برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک‌های شور و غیر شور.....جلال قادری، محمدحسین داوودی، ندا محمدی و کمال خلخال

۳۲۱.....پاسخ‌های تغذیه‌ای و فیزیولوژیکی نارنگی انشو میاگاوا (*Citrus unshiu cv. Miyagawa*) با پایه نارنج (*Citrus aurantium L.*) به خاک‌های آهکی در استان مازندران.....علی اسدی کنگرشاهی و نگین اخلاقی امیری

۳۴۵.....بررسی ویژگی‌های شیمیایی و ساختاری اسید هیومیک استخراجی از لئوناردیت‌های برخی معادن کرمان.....راضیه آهسته، مجید حجازی مهریزی، ناصر پرومند، مهدی سرچشمه پور و مجید فکری

۳۶۱.....ارزیابی اثر تغییر کاربری اراضی بایر به باغ زیتون بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک: مطالعه موردی در استان گیلان.....سمیرا همتی، کامران مروج، میرناصر نویدی، احمد گلچین و جواد سیدمحمدی

وزارت جهاد کشاورزی  
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

انجمن علوم خاک ایران

مؤسسه تحقیقات خاک و آب

نشریه  
پژوهش‌های خاک

جلد ۳۹ شماره (۳)

۱۴۰۴

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 مؤسسه تحقیقات خاک و آب

مدیر مسئول: دکتر هادی اسدی رحمانی

استاد مؤسسه تحقیقات خاک و آب

سر دبیر: دکتر حمید سیادت

اعضاء هیأت تحریریه (به ترتیب حروف الفبا):

مدرس دانشگاه

دکتر محمد بای بوردی

استاد مؤسسه تحقیقات خاک و آب

دکتر حسین بشارتی

استادیار مؤسسه تحقیقات خاک و آب

دکتر محمدرضا بلالی

دانشیار مؤسسه تحقیقات خاک و آب

دکتر کامبیز بازرگان

دانشیار دانشگاه تهران

دکتر حسن توفیقی

استاد دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر غلامحسین حق نیا

استاد مؤسسه تحقیقات خاک و آب

دکتر کاظم خاوازی

دانشیار پژوهش سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی

دکتر محمدحسن روزیطلب

استاد پژوهش مؤسسه تحقیقات خاک و آب

دکتر حمید سیادت

استاد دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر امیر فتوت

استاد دانشگاه تهران

دکتر منوچهر گرجی

دانشیار مؤسسه تحقیقات خاک و آب

دکتر عزیز مؤمنی

استاد دانشگاه تبریز

دکتر محمدرضا نیشابوری

دکتر حمید سیادت

ویراستار انگلیسی:

مهندس کیانا خامه‌چی

ویراستار فنی:

چهار شماره

تعداد انتشار در سال:

این نشریه در پایگاه‌های علمی زیر نمایه می‌شود:

www.srjournal.areeo.ir :

www.isc.gov.ir

پایگاه استنادی علوم جهان اسلام (ISC):

پایگاه الکترونیکی نشریه پژوهش‌های خاک

www.swri.ir

پایگاه الکترونیکی مؤسسه تحقیقات خاک و آب:

و همچنین در پایگاه (ISC) از ضریب تأثیر (IF) برخوردار می‌باشد

پایگاه الکترونیکی انجمن علوم خاک ایران: www.soiliran.org

www.sid.ir

پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی:

majalehsoil@yahoo.com

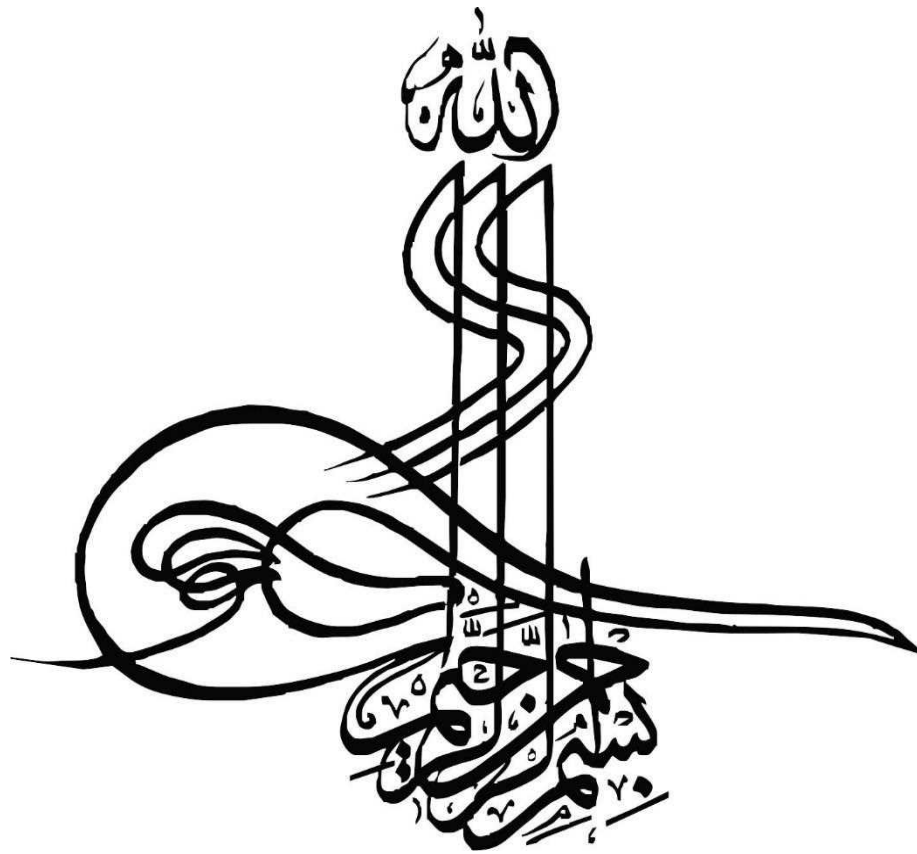
آدرس الکترونیکی دفتر مجله:

www.civilica

آدرس: کرج - میدان استاندارد، جاده مشکین دشت، بعد از رزکان نو، بلوار امام خمینی، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، کد پستی: ۳۱۷۷۹۹۳۵۴۵

آدرس پایگاه الکترونیکی مجله: www.srjournal.areeo.ir

تلفن و نمایر: ۳۶۲۰۸۷۹۶ (۰۲۶)





به یاد استاد فرهیخته، جناب آقای دکتر عزیز مؤمنی  
رئیس پیشین بخش تحقیقات خاکشناسی، عضو هیأت علمی بازنشسته و عضو هیأت تحریریه  
«نشریه پژوهش‌های خاک» مؤسسه تحقیقات خاک و آب

نام ایشان، به‌عنوان یکی از چهره‌های برجسته و اثرگذار علم خاک‌شناسی کشور، با سال‌ها  
خدمات علمی ارزشمند، برای جامعه پژوهشی کشور به‌شمار می‌رود.  
درگذشت این استاد فقید را به بازماندگان محترم و جامعه علمی کشور تسلیت گفته و یاد و  
خاطره‌ی وی را همواره زنده نگه می‌داریم.

نام و یادشان گرامی، و روانشان شاد باد.

## فهرست مقالات

- ۲۴۷.....شناخت وضعیت شوری خاک باغ ها انار ساوه.....محمدعلی خودشناس و جواد قدبیک‌لو
- ۲۶۳.....پویایی و توزیع شکل‌های مختلف فسفر و پتاسیم در خاک اطراف ریشه ذرت و سیب‌زمینی در اثر کودآبیاری با سیستم آبیاری قطره‌ای.....میشم رضائی، مصطفی مارزی، کامبیز بازرگان، کریم شهبازی و میثم چراغی
- ۲۸۷.....پویایی پتاسیم خاک و ارتباط آن با کانی‌شناسی رس‌ها در خاک‌های زراعی دشت دامنه‌ای شهرکرد.....مرضیه براتی زانباری، علیرضا حسین‌پور، محمدحسن صالحی و اعظم جعفری
- ۳۰۳.....تأثیر رطوبت بر اکسایش گوگرد و برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک‌های شور و غیر شور.....جلال قادری، محمدحسین داوودی، ندا محمدی و کمال خلخال
- ۳۲۱.....پاسخ‌های تغذیه‌ای و فیزیولوژیکی نارنگی انشو میاگاوا (*Citrus unshiu cv. Miyagawa*) با پایه نارنج (*Citrus aurantium L.*) به خاک‌های آهکی در استان مازندران.....بررسی ویژگی‌های شیمیایی و ساختاری اسید هیومیک استخراجی از لئوناردیت‌های برخی معادن کرمان.....راضیه آهسته، مجید حجازی مهریزی، ناصر برومند، مهدی سرچشمه پور و مجید فکری
- ۳۶۱.....ارزیابی اثر تغییر کاربری اراضی بایر به باغ زیتون بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک: مطالعه موردی در استان گیلان.....سمیرا همتی، کامران مروج، میرناصر نویدی، احمد گلچین و جواد سیدمحمدی

## راهنمای تهیه مقاله برای انتشار در نشریه علمی پژوهش‌های خاک

### اهداف و دامنه فعالیت نشریه

مجله علمی-پژوهشی **پژوهش‌های خاک** با هدف ارتقای آگاهی محققان و پژوهشگران، افزایش سطح دانش و پژوهش و معرفی اندیشه‌ها، نوآوری‌ها و خلاقیت‌های علمی-پژوهشی در سطح ملی و بین‌المللی تأسیس شده است. این مجله بستری برای تعامل میان پژوهشگران، اعضای هیات علمی، دانشجویان، کارشناسان، مروجان، مدیران و سیاست‌گذاران حوزه کشاورزی، محیط‌زیست و منابع طبیعی فراهم می‌کند. تمرکز اصلی مجله بر انتشار پژوهش‌های مرتبط با شناسایی، حفاظت و بهره‌برداری پایدار از منابع خاک و آب است. محورهای تحت پوشش مجله شامل: ژنز و رده بندی خاک، ارزیابی و تناسب اراضی، نقشه برداری رقومی خاک، شیمی و حاصلخیزی خاک، فیزیک خاک، فرسایش خاک، روابط آب، خاک و گیاه، زیست‌شناسی و بیوشیمی خاک، تغذیه گیاه، کربن آلی خاک، تنش‌های محیطی مانند خشکی، شوری، فشرده‌گی خاک و سایر تنش‌های مرتبط با سلامت خاک-گیاه-محصولات کشاورزی، پایش کمی و کیفی منابع خاک، بهره‌وری خاک و آب، مدیریت و حفاظت خاک، آلودگی، اصلاح و پالایش خاک، کشاورزی حفاظتی و فناوری‌های نوین مانند سنجش از دور، GIS، فناوری نانو، داده‌ورزی، مدل‌سازی و کاربرد هوش مصنوعی در علوم خاک است. این مجله همچنین موضوعات مرتبط با تأثیر عوامل خاکی-آبی بر سلامت و کیفیت محصولات خوراکی کشاورزی، فناوری‌های تولید و مصرف انواع کودها، به‌سازهای خاک، بهبود دهنده‌های رشد گیاهان و بسترهای کشت را نیز پوشش می‌دهد. پژوهش‌های بین‌رشته‌ای که به توسعه پایدار کشاورزی، امنیت غذایی و حفاظت محیط زیست مرتبط با خاک و آب کمک کنند، در دامنه انتشار مجله قرار دارند.

### انواع دست‌نوشته‌ها و محدودیت‌ها

نشریه پژوهش‌های خاک پذیرای مقالات پژوهشی اصیلی (Original Articles) است که حاصل تحقیق و بررسی نوآورانه نویسندگان در حوزه‌های مختلف علوم خاک و یا سایر حوزه‌های مرتبط، در دامنه فعالیت مجله باشند. این مقالات باید شامل داده‌های اصیل، تحلیل‌های دقیق و نتایج علمی معتبر باشند. علاوه بر آن، مقالات مروری (Review Articles) که پیشرفت‌های علمی مرتبط با اهداف و دامنه فعالیت نشریه را به‌صورت نظام‌مند و تحلیلی بررسی می‌کنند، پذیرفته می‌شوند. سایر انواع دست‌نوشته‌ها مانند یادداشت‌های کوتاه، گزارش‌های فنی یا مقالات روش‌شناختی، تنها در صورت انطباق با سیاست‌های مجله و تأیید سردبیر قابل انتشار هستند. مقالاتی که فاقد نوآوری باشند، ساختار نامناسب داشته باشند یا نتایج آن‌ها به‌طور کامل تشریح و تفسیر نشده باشد، برای انتشار پذیرفته نخواهند شد.

### اصول کلی ارسال مقاله

ارسال مقاله به نشریه پژوهش‌های خاک به منزله پذیرش شرایط زیر از سوی نویسنده یا نویسندگان است:

۱. محتوای مقاله پیش‌تر در هیچ نشریه‌ای (به زبان فارسی یا سایر زبان‌ها) منتشر نشده و به‌طور هم‌زمان برای بررسی به مجله یا ناشر دیگری ارسال نشده است.
۲. تمامی نویسندگان مقاله و در صورت لزوم مقامات مسئول در مؤسسه یا سازمان محل انجام پژوهش، به‌صورت رسمی یا ضمنی انتشار مقاله را تأیید کرده‌اند.
۳. نویسنده مسئول تضمین می‌کند که تمامی اطلاعات ارائه شده صحیح بوده و رعایت اصول اخلاق پژوهش در تهیه و نگارش مقاله انجام شده است.
۴. دفتر نشریه و ناشر هیچ‌گونه مسئولیتی در قبال دعاوی احتمالی ناشی از محتوای مقاله بر عهده نخواهند داشت. در صورت احراز مغایرت با اصول فوق، مقاله در هر مرحله از فرایند انتشار و حتی پس از انتشار، از نشریه بازپس‌گیری (Retracted) خواهد شد.
۵. مقاله باید به زبان فارسی روان و پیراسته از غلط‌های نگارشی و نوشتاری باشد. از آوردن واژه‌های بیگانه که معادل شناخته شده فارسی دارند، جداً خودداری گردد.

۶. مسئولیت صحت و سقم مطالب، نظرات و عقاید مندرج در مقالات به عهده نویسنندگان مقاله می‌باشد. حقوق معنوی مقالات برای نویسندگان محفوظ می‌باشد.
۷. مقالاتی که مبنی بر آزمایش‌هایی است که بیش از ۳ سال از خاتمه اجرای آن گذشته است از شانس کمتری برای پذیرش برخوردار خواهند بود و نویسندگان باید علت تأخیر در نوشتن مقاله را توجیه کنند.

### نسخه‌های ارسالی به دفتر نشریه

نویسندگان موظف‌اند هنگام ارسال مقاله از طریق سامانه دریافت مقالات نشریه، همه فایل اصلی را بارگذاری نمایند:

۱. **فایل اصلی مقاله:** شامل متن کامل مقاله به همراه جداول و شکل‌ها، اما بدون نام و مشخصات نویسندگان، به‌منظور رعایت فرآیند داوری همتا به‌صورت ناشناس (Double-Blind Review).
۲. **فایل مشخصات نویسندگان:** شامل نام و نام خانوادگی همه نویسندگان، وابستگی سازمانی، نشانی پستی، پست الکترونیک و مشخصات نویسنده مسئول. ترتیب نام نویسندگان باید دقیقاً مطابق با ترتیب درج‌شده در مقاله رعایت شود.
۳. **فرم تعارض منافع:** تکمیل و امضای فرم مربوطه توسط نویسندگان جهت اعلام هرگونه تعارض منافع احتمالی.
۴. **فرم تعهد نویسنندگان:** تکمیل و امضای فرم تعهد مبنی بر اصالت مقاله، عدم ارسال همزمان به سایر نشریات و تأیید مشارکت تمامی نویسندگان در انجام پژوهش.

**نکته:** حداکثر مشابهت مجاز در هر مقاله ۲۰ درصد است. در این بازه ۲۰ درصد، درصد مشابهت با هر مطالعه قبلی نباید بیشتر از ۲ درصد باشد. مقالاتی که درصد مشابهت بالای ۲۰ درصد داشته باشند و یا از یک منبع بیش از ۲ درصد استفاده کرده باشند، برای ادامه فرآیند بررسی و چاپ در نظر گرفته نمی‌شوند.

### تعداد صفحات مقاله

مقالات ارسالی به نشریه، شامل تمامی بخش‌ها (چکیده فارسی و انگلیسی، متن اصلی، جداول و نمودارها، منابع و پیوست‌ها)، باید مطابق با قالب ارائه‌شده در این راهنما تدوین شوند. حداکثر حجم مجاز هر مقاله ۲۰ صفحه در همین قالب است. در صورت تجاوز از این حد، مقاله جهت اصلاح به نویسندگان بازگردانده خواهد شد.

### واژه‌های خارجی در متن فارسی

در نگارش مقالات فارسی، توصیه می‌شود تا حد امکان از معادل‌های فارسی مصوب و رایج برای واژه‌ها و اصطلاحات خارجی استفاده گردد. در مواردی که معادل فارسی برای یک واژه وجود ندارد یا استفاده از آن غیردقیق و نامأنوس است، باید واژه اصلی (لاتین) تنها در اولین اشاره به کار برده شود. در این حالت، واژه لاتین در قالب زیرنویس (Footnote) در همان صفحه درج خواهد شد.

- ✓ از به‌کار بردن هم‌زمان واژه فارسی و لاتین در متن اصلی پرهیز شود.
- ✓ در صورتی که یک اصطلاح تخصصی در متن چندین بار تکرار می‌شود، تنها بار نخست نیاز به ذکر معادل لاتین در زیرنویس دارد.
- ✓ نام‌های خاص، نرم‌افزارها، تجهیزات و اختصارات علمی باید به‌صورت دقیق و استاندارد نوشته شوند.

### زیرنویس‌ها

در صورت نیاز به درج زیرنویس در متن مقاله، رعایت موارد زیر الزامی است:

۱. زیرنویس‌های فارسی باید به صورت **راست چین** و زیرنویس‌های لاتین به صورت **چپ چین** نوشته شوند.
۲. در ابتدای هر زیرنویس، شماره مربوطه درج شده و سپس یک نقطه (.) و یک فاصله قرار گیرد؛ پس از آن متن زیرنویس تایپ شود.
۳. فونت و اندازه زیرنویس‌ها به شرح زیر است:

✓ زیرنویس فارسی: B Nazanin، اندازه ۱۰

✓ زیرنویس انگلیسی: Times New Roman، اندازه ۹

۴. شماره‌گذاری زیرنویس‌ها باید به صورت پیوسته در کل مقاله انجام شود و از تکرار شماره‌گذاری مجزا در صفحات مختلف خودداری گردد.
۵. استفاده از زیرنویس باید به حداقل و فقط در موارد ضروری مانند توضیح واژه‌های تخصصی، ارائه معادل لاتین یا توضیحات تکمیلی محدود شود.

### معرفی نشانه و متغیرها در متن

تمامی نشانه‌ها، علائم و متغیرهای مورد استفاده در مقاله باید در **اولین اشاره در متن** به‌طور کامل معرفی و تعریف شوند. نویسندگان باید:

۱. در اولین استفاده از هر متغیر یا نماد، نام کامل آن را در متن آورده و سپس اختصار یا علامت مربوطه را در پرانتز ذکر کنند. مثال: ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC).
۲. از به‌کارگیری نمادها و اختصارات غیراستاندارد یا مبهم پرهیز نمایند.
۳. در صورت وجود تعداد زیاد نمادها و متغیرها، **جدولی تحت عنوان نمادها و اختصارات (Symbols and Abbreviations)** در ابتدای مقاله یا در پیوست درج شود.
۴. واحدهای تمامی متغیرهای کمی باید مطابق با **استاندارد بین‌المللی واحدها (SI Units)** ذکر شوند.

### فرمت کلی و ساختار مقاله

مقالات ار سالی به نشریه پژوهش‌های خاک باید ساختاری منظم و استاندارد داشته باشند تا امکان ارزیابی و انتشار علمی فراهم شود. هر مقاله معمولاً شامل بخش‌های زیر است: **عنوان و صفحه‌ مشخصات نویسندگان**، چکیده فارسی (ساده) و انگلیسی (مبسوط)، **واژگان کلیدی**، **مقدمه**، مواد و روش‌ها، نتایج، بحث، نتیجه‌گیری، **قدردانی**، منابع و جداول و شکل‌های مرتبط که معمولاً در بخش مواد و روش و نتایج ارائه می‌شوند. رعایت ترتیب و قالب این بخش‌ها به نویسندگان کمک می‌کند تا پژوهش خود را به‌صورت شفاف و قابل فهم ارائه دهند، و داوران و خوانندگان بتوانند با سهولت روند علمی و کیفیت مقاله را ارزیابی کنند. در ادامه الزامات مورد نیاز برای تهیه هر یک از این بخش‌ها به‌طور خلاصه شرح داده شده است.

### صفحه عنوان مقاله و اطلاعات مؤلفان

عنوان مقاله باید روان، گویا، مختصر و منعکس‌کننده محتوای تحقیق باشد و در عین حال از واژگان کلیدی مقاله متمایز باشد. در زیر عنوان، نام و نام خانوادگی نویسندگان به همراه وابستگی سازمانی و پست الکترونیک آن‌ها درج می‌شود. لازم است نویسنده مسئول (Corresponding Author) مشخص شود و اطلاعات کامل شامل وابستگی سازمانی، ایمیل و آدرس پستی دقیق ارائه گردد. برای یکپارچگی فرمت، عنوان مقاله با قلم B Nazanin، اندازه ۱۴، Bold، نام مؤلفان با قلم B Nazanin، اندازه ۱۲، Bold، آدرس‌ها با قلم

B Nazanin، اندازه ۱۱ و ایمیل ها با قلم Times New Roman، سایز ۹ و به رنگ آبی نوشته شود. خلاصه‌ای از نوع و اندازه قلم برای هر بخش از مقاله در جدول ۳ ارائه شده است.

## چکیده و کلیدواژه‌ها

### چکیده‌ها

مقالات ارسالی به نشریه پژوهش‌های خاک باید شامل دو چکیده باشند: **چکیده مبسوط به زبان انگلیسی و چکیده کوتاه به زبان فارسی**. ترتیب ارائه چکیده‌ها در متن مقاله به این صورت است که ابتدا چکیده مبسوط انگلیسی و سپس چکیده فارسی درج می‌شود.

### چکیده فارسی

چکیده فارسی باید به صورت روشن و مستقیم به مسئله پژوهش، اهداف، مواد و روش‌ها، یافته‌ها و نتیجه‌گیری اشاره کند. از کلی‌گویی، مقدمه‌پردازی طولانی یا ارجاع به منابع در این بخش خودداری شود. هر بخش از چکیده در سطر جداگانه آورده شود. طول چکیده بین ۲۰۰ تا ۲۵۰ کلمه باشد. تنظیم متن با فاصله خطوط *Single* و چینش *Justify* انجام گیرد. فونت چکیده فارسی B Mitra با اندازه ۱۱ و کلمه «چکیده» با B Titr با اندازه ۱۲ و پررنگ (Bold) نوشته شود. کلمات انگلیسی احتمالی در متن فارسی با قلم Times New Roman و اندازه ۹ درج گردند.

### چکیده انگلیسی

چکیده انگلیسی باید مبسوط، ساختارمند و جامع‌تر از چکیده فارسی باشد و شامل بخش‌های مشخص با تیتراهای زیر باشد:

- Objectives
- Methodology
- Results
- Conclusion

طول چکیده انگلیسی بین ۴۵۰ تا ۷۵۰ کلمه بوده و لزوماً ترجمه مستقیم چکیده فارسی نیست، بلکه باید بازنویسی علمی و دقیق از محتوای پژوهش باشد. استفاده از ابزارهای ترجمه خودکار مانند Google Translate توصیه نمی‌شود؛ واژگان تخصصی باید به‌درستی ترجمه و بازبینی شوند. نوع قلم در چکیده انگلیسی Times New Roman با اندازه ۹ باشد.

**نکته ۱:** در صفحه ویژه چکیده انگلیسی، علاوه بر متن چکیده، اطلاعات زیر باید ارائه شود:

- عنوان مقاله (Times New Roman، اندازه ۱۴، Bold)
- نام و نام خانوادگی نویسندگان (Times New Roman، اندازه ۱۲، Bold)
- وابستگی سازمانی نویسندگان و ایمیل (Times New Roman، اندازه ۹)
- متن چکیده مبسوط (Times New Roman، اندازه ۹)

### واژگان کلیدی (Keywords)

هر مقاله باید شامل ۴ تا ۶ واژه کلیدی باشد که بازتاب‌دهنده محتوای اصلی پژوهش باشند. انتخاب کلیدواژه‌ها باید به‌گونه‌ای صورت گیرد که امکان نمایه‌سازی و بازیابی بهتر مقاله را فراهم سازد. کلیدواژه‌ها در یک سطر و به ترتیب حروف الفبا نوشته شده و با علامت ویرگول (،) از یکدیگر جدا شوند.

- واژگان کلیدی فارسی: با قلم B Nazanin و اندازه ۱۲ تایپ شوند.
- واژگان کلیدی انگلیسی: ترجمه دقیق معادل‌های فارسی باشند و با قلم Times New Roman و اندازه ۱۲ نوشته شوند.
- از تکرار واژه‌هایی که عیناً در عنوان مقاله ذکر شده‌اند، باید خودداری شود.
- ترجیحاً از واژه‌های استاندارد و پرکاربرد در نمایه‌سازی پایگاه‌های علمی استفاده گردد.

## مقدمه

مقدمه باید اهمیت پژوهش انجام‌شده را به‌وضوح نشان دهد و مسئله مورد بررسی را با مروری انتقادی بر پژوهش‌های پیشین، مکانیسم‌های مرتبط و یافته‌های علمی قبلی تبیین کند. ساختار مقدمه بهتر است به‌صورت تدریجی از کلی به جزئی باشد؛ به این معنا که پاراگراف نخست بر اهمیت کلی موضوع و ضرورت پژوهش در زمینه مربوطه تأکید داشته باشد و در ادامه، هر پاراگراف به یک جنبه تخصصی‌تر یا یافته‌های پیشین مرتبط پرداخته و زمینه‌سازی لازم برای بیان اهداف تحقیق را فراهم آورد.

پاراگراف‌ها باید منسجم، مرتبط و یکپارچه باشند و از پراکنده‌نویسی پرهیز شود. طول هر پاراگراف معمولاً بین ۸ تا ۱۳ خط توصیه می‌شود. در پاراگراف پایانی مقدمه، تمرکز اصلی باید بر شکاف پژوهشی (Research Gap) موجود، اهداف مشخص تحقیق و در صورت لزوم، فرضیات پژوهش قرار گیرد. این بخش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و باید به‌روشنی تدوین گردد.

متن مقاله باید به‌صورت تک‌ستونی، قلم B Mitra و اندازه ۱۳ و با فاصله خطوط تک‌فاصله (Single Space) تنظیم شود. کلمات انگلیسی درون متن فارسی باید با ۲ اندازه کوچکتر از متن فارسی و قلم Times New Roman تنظیم شوند. عنوان تیتراها با قلم B Titr و اندازه ۱۱ تنظیم شود. عنوان هر بخش یا زیربخش با یک سطر فاصله از انتهای متن بخش قبلی درج شود. در نگارش مقاله از شماره‌گذاری عنوان‌ها خودداری گردد.

## مواد و روش‌ها

در این بخش باید شرح کامل، دقیق و جزئیات مربوط به مواد و روش‌های مورد استفاده در پژوهش ارائه شود. این توضیحات باید به اندازه‌ای شفاف باشند که امکان تکرار پژوهش توسط سایر محققان وجود داشته باشد. اطلاعات این بخش می‌تواند شامل موارد زیر باشد: جامعه آماری یا منطقه مورد مطالعه، روش‌های نمونه‌گیری، تیمارهای آزمایشی، دستگاه‌ها و مواد مورد استفاده (به همراه مشخصات فنی و نام شرکت سازنده)، روش‌های تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها.

برای افزایش وضوح و انسجام، توصیه می‌شود این بخش با زیرتیتراهای موضوعی (مانند «منطقه مطالعه»، «روش نمونه‌گیری»، «اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی»، «روش‌های آماری») سازمان‌دهی شود. این امر به نویسندگان کمک می‌کند تا با دقت و تمرکز بیشتری به هر بخش بپردازند.

در مواردی که از روش‌های استاندارد یا متداول و پیش‌تر منتشر شده استفاده شده باشد، نیازی به ارائه شرح کامل نیست و صرفاً ذکر میانی روش به همراه ارجاع به منابع معتبر کافی است. در صورت اعمال تغییرات یا اصلاحات در روش‌های موجود، باید این تغییرات به‌طور شفاف توضیح داده شوند.

## نتایج

این بخش باید جدای از بحث باشد. در این بخش باید نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش به‌صورت دقیق، روشن و بدون تفسیر یا بحث ارائه شوند. نتایج می‌توانند در قالب متن، جداول و نمودارها گزارش شوند. توضیحات متنی باید مکمل جداول و نمودارها باشند و از تکرار داده‌ها در متن و جدول/شکل خودداری گردد.

ترتیب ارائه نتایج بهتر است تا حد امکان مطابق با ساختار بخش مواد و روش‌ها باشد تا انسجام مقاله حفظ شود. هر نتیجه باید به‌طور مستقیم به هدف یا پرسش پژوهش مرتبط باشد.

توصیه می‌شود **بخش نتایج و بحث به صورت جداگانه** ارائه شوند؛ این جداسازی به نویسندگان امکان می‌دهد با دقت و تمرکز بیشتری ابتدا یافته‌ها را گزارش کرده و سپس در بخش بعدی به تفسیر، مقایسه با پژوهش‌های پیشین و تحلیل علمی آنها بپردازند.

## جدول‌ها

هر جدول باید شامل شماره، عنوان، سرستون‌ها و متن جدول باشد. شماره و عنوان جدول در بالای جدول درج می‌شوند و باید به زبان **فارسی و انگلیسی** ارائه شوند. **اعداد در جدول به انگلیسی** درج شوند، **متن یا واژه‌های درون جدول و توضیحات جدول** نیز باید **هم به فارسی و هم به انگلیسی** نوشته شود.

جدول باید با یک خط افقی از شماره و عنوان خود جدا شود و سر جدول نیز با یک خط افقی از متن داده‌ها جدا گردد. در زیر متن جدول یک خط افقی دیگر رسم شود. در متن جدول تا حد امکان از خطوط افقی و عمودی اضافی پرهیز شود. هر ستون جدول باید عنوان و واحد کمیت مربوطه را داشته باشد؛ اگر همه ارقام یک واحد مشترک دارند، واحد در توضیحات یا عنوان اصلی جدول ذکر شود.

اختصارات یا توضیحات اضافی باید در زیرنویس جدول ارائه شوند. جدول‌ها باید در اولین مکان ممکن پس از اشاره به آن‌ها در متن قرار گیرند و نسبت به دو طرف صفحه **وسط‌چین** باشند. مطالب داخل جدول وسط‌چین تنظیم شود. تمامی اعداد فارسی و وسط‌چین درج شوند و در صورت استفاده از ممیز، از "/" به جای نقطه استفاده نشود (مثال: 3.6 صحیح و 3/6 اشتباه است).

## فونت و سایز جداول:

- عنوان فارسی بالای جدول: B Mitra 11, Bold
- عنوان لاتین بالای جدول: Times New Roman 9, Bold
- عنوان ستون‌ها: B Mitra 10, Bold
- متن فارسی داخل جدول: B Mitra 10
- متن انگلیسی داخل جدول: Times New Roman 8

هر جدول باید با یک سطر فاصله از متن قبل و بعد از خود قرار گیرد و اگر از منبعی استفاده شده است، مرجع باید در انتهای عنوان جدول ذکر شود. جدول (۱) نمونه‌ای از یک فرمت قابل قبول است

جدول ۱- نمونه‌ای از یک جدول مناسب برای ارائه در متن مقاله

Table 1. An example of a table suitable for presentation in the manuscript

عمق / Depth (cm)	TNV (%)	EC (dS.m <sup>-1</sup> )	pH	OC (%)	P <sub>av</sub>	K <sub>av</sub>	Mg <sub>ex</sub>	بافت خاک* / Soil texture
					(mg.kg <sup>-1</sup> )			
0-10	28	1.6	7.6	0.62	12.4	290	300	لومی رسی / Loam clay
10-20	30	2.2	7.2	0.50	6.3	295	305	لومی رسی / Loam clay
20-30	33	4.5	8.5	0.21	4.5	332	286	لومی شنی / Loam sandy

\* فونت و ساختار این جدول مطابق با دستورالعمل نشریه تهیه شده است.

\* The font and structure of this table have been prepared according to the journal's guidelines.

## شکل‌ها

هر شکل، اعم از نمودار، چارت، نقشه یا تصویر، باید شامل شماره و عنوان کامل **به فارسی و انگلیسی** باشد. از به کار بردن عناوینی مانند نمودار، عکس یا نقشه خودداری شود و تمامی آن‌ها با عنوان **"شکل/ Figure"** درج شوند. شماره‌گذاری شکل‌ها به ترتیب از شماره ۱ انجام می‌شود. عنوان شکل به صورت وسط‌چین در زیر شکل قرار می‌گیرد.

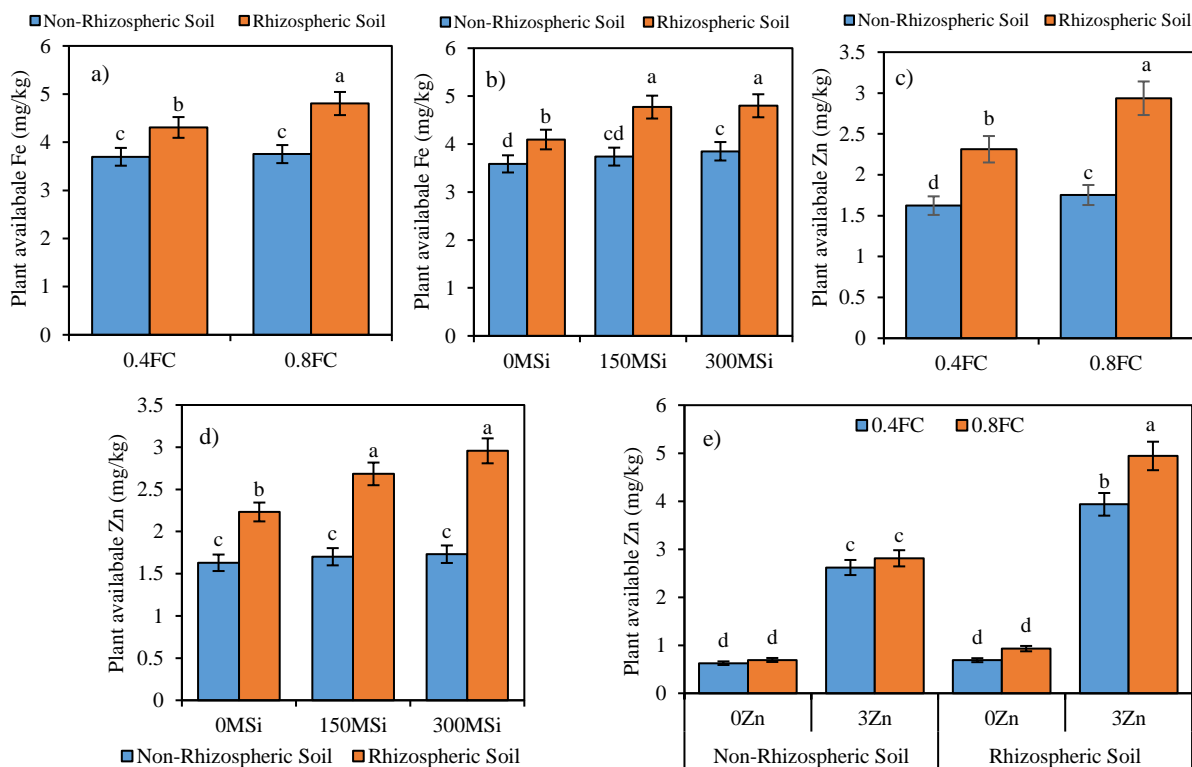
نتایج ارائه شده در جداول یا شکل‌ها نباید به شکل دیگری مانند متن نوشتاری در بخش دیگری از مقاله تکرار شوند. شکل‌ها می‌توانند به صورت رنگی یا سیاه و سفید باشند و باید **در محل ارجاع به آن‌ها در متن درج شوند**. ذکر واحد کمیت‌ها در شکل‌ها الزامی است و همه شکل‌ها باید در متن به طور دقیق ارجاع داده شوند. در تهیه شکل‌ها توجه شود که اندازه اعداد، متن‌ها، واحدها و Legend به اندازه کافی بزرگ باشد تا پس از درج در مقاله کاملاً خوانا باشند. در صورت استفاده از تصویر خروجی نرم‌افزار، کیفیت تصویر باید بالا باشد.

اگر یک شکل شامل چند تصویر یا نمودار است، زیر شکل‌ها باید با حروف a, b, c و ... مشخص شوند و در متن مقاله نیز به همراه شماره شکل به آن‌ها ارجاع داده شود. تمام اختصارات موجود در شکل‌ها باید در **زیرنویس و بلافاصله پس از عنوان شکل** توضیح داده شوند. **تمام اعداد و توضیحات داخل شکل باید به انگلیسی** ارائه شوند. عنوان و توضیحات شکل نیز باید هم به فارسی و هم به انگلیسی درج شوند. اندازه فونت محورهای نمودار و اعداد باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا پس از کوچک شدن نیز خوانا باقی بماند.

### فونت و سایز شکل‌ها:

- عنوان فارسی شکل: B Mitra 11, Bold
- عنوان انگلیسی شکل: Times new roman 9, Bold
- حروف انگلیسی در عنوان فارسی (در صورت وجود) باید با دو اندازه کوچکتر و با قلم Times new roman نوشته شوند.

### مثال:



شکل ۱- اثر سیلیسیم، روی و محتوای آب خاک بر غلظت آهن (a, b) و روی (c-e) در خاک ریزوسفری و غیرریزوسفری. تیمارها شامل 0Si (شاهد؛ بدون سیلیسیم)، 150MSi و 300MSi (کاربرد ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی گرم سیلیسیم در کیلوگرم)، 0Zn (شاهد، بدون روی) و 3Zn (۳ میلی گرم روی در کیلوگرم خاک)، تحت دو محتوای متفاوت رطوبت خاک؛ 0.4 FC (تنش خشکی) و 0.8FC (رطوبت بهینه). حروف متفاوت روی ستون‌ها نشان دهنده تفاوت معنی دار بین تیمارها بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن هستند ( $p \leq 0.05$ ).

Fig. 4. Effects of silicon, zinc, and soil water content on iron (a, b), and zinc (c-e) concentrations in rhizosphere and non-rhizosphere soils. Treatments include 0Si (no Si), 150MSi and 300MSi (150 and 300 mg Si kg<sup>-1</sup>), 0Zn (no Zn), and 3Zn (3 mg Zn kg<sup>-1</sup>), under two SWC: 0.4 FC (drought stress) and 0.8 FC (optimal). Different letters indicate significant differences among treatments based on Duncan's multiple range test ( $p \leq 0.05$ ).

## فرمول‌ها و روابط ریاضی

**استفاده از Microsoft Equation در نوشتن فرمول‌ها الزامی است.** برای نمایش روابط و فرمول‌های ریاضی از جدول دوستونی با خطوط نامرئی مطابق نمونه زیر استفاده شود. در ستون سمت راست، شماره رابطه و در ستون سمت چپ، رابطه یا فرمول مربوطه نوشته شود. در صورتی که فرمول‌ها در محیط word نسخه ۲۰۰۷ تهیه شوند، فایل ارسال باید با پسوند docx ذخیره شود تا از تبدیل شدن فرمول‌ها به عکس جلوگیری شود. تمام روابط ریاضی به ترتیب از ۱ شماره‌گذاری شوند و شماره هر رابطه با پرانتز جدا شود.

\* فونت و سایز فرمول‌ها و روابط ریاضی: (Times New Roman 11)

دو نمونه رابطه در زیر آمده است.

$$\text{LOD} = \frac{3 \times Sb}{m} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\text{LOQ} = 3.3 \times \text{LOD} \text{ or } \text{LOQ} = \frac{10 \times Sb}{m} \quad \text{رابطه (۲)}$$

نکته: همه توضیحات و اجزای داخل فرمول باید در زیر فرمول معرفی شوند. برای مثال: در این رابطه‌ها، LOD حد تشخیص، LOQ حد کمی‌سازی،  $S_b$  انحراف معیار نمونه‌های شاهد و  $m$  شیب منحنی کالیبراسیون است.

## بحث

در بخش بحث، یافته‌های مهم و کلیدی مقاله باید با ارجاع به منابع معتبر تفسیر و تحلیل شوند. نویسندگان باید تلاش کنند که نتایج مطالعه خود را نه تنها با ذکر موافق یا مخالف بودن نسبت به مطالعات پیشین، بلکه با تحلیل مکانیسم‌ها و شواهد علمی تفسیر کنند. برای نوشتن یک بحث قوی به موارد زیر توجه کنید:

۱. **ارجاع به نتایج خود:** به نتایج و مشاهدات تحقیق اشاره شود و از آنها برای پشتیبانی از تحلیل استفاده شود.
۲. **استفاده از مکانیسم‌های علمی:** یافته‌ها باید با توجه به مکانیسم‌های زیر بنایی موجود و داده‌های مطالعات پیشین تحلیل شوند و دلایل قبول یا رد نتایج با استناد به شواهد علمی توضیح داده شود.
۳. **مقایسه با مطالعات قبلی:** صرفاً بیان موافق یا مخالف بودن با نتایج پیشین کافی نیست؛ نویسنده باید نشان دهد که چرا نتایج مطالعه وی با نتایج دیگران هماهنگ یا متفاوت است و چه مکانیسم یا دلیل علمی مشاهدات آنها را توجیه می‌کند.

۴. **ارجاع به منابع جدید:** در تفسیر نتایج، استفاده از منابع به‌روز و معتبر (ترجیحاً استفاده از مقالات منتشر شده در ۳ سال اخیر) اهمیت بالایی دارد.

۵. **تمرکز بر هدف اصلی پژوهش:** بخش بحث باید به گونه‌ای نوشته شود که پیوسته به هم باشد و هدف اصلی مطالعه و فرضیه‌های کلیدی مقاله روشن و پشتیبانی شوند.

**\*\* نکته مهم:** مقالاتی که بخش بحث آن‌ها صرفاً بر اساس گزارش نتایج و بیان موافق یا مخالف بودن با مطالعات قبلی نوشته شود، در نشریه پژوهش‌های خاک قابل پذیرش نیستند. نویسندگان قبل از ارسال مقاله باید از رعایت این نکته اطمینان حاصل کنند.

### نتیجه‌گیری

ارائه بخش نتیجه‌گیری و جمع‌بندی پس از متن اصلی مقاله الزامی است. این بخش باید با توجه به هدف و سوال تحقیق نوشته شود و یافته‌های مطالعه انجام شده برای پاسخ به سوال اصلی تحقیق تشریح گردد. توجه شود که این بخش نباید هم‌پوشانی زیادی با چکیده داشته باشد، در اینجا باید چکیده‌ای از تفسیر نتایج در ارتباط با هدف مطالعه ارائه شود. بهتر است در سطر پایانی نتیجه‌گیری، پیشنهادی برای آینده تحقیقاتی این زمینه ارائه شود. بنابراین، در صورت داشتن پیشنهاد، می‌توانید آن‌ها را در انتهای نتیجه‌گیری قرار دهید. توصیه می‌شود که نتیجه‌گیری تا حد ممکن کوتاه نوشته شود و از بیان جزئیات نتایج که باید در چکیده نوشته شود، خودداری شود.

### تشکر و قدردانی

در این بخش، نویسندگان می‌توانند از افراد، سازمان‌ها یا نهادهایی که در اجرای پژوهش همکاری یا حمایت داشته‌اند، تشکر و قدردانی نمایند. این قسمت باید کوتاه، مختصر و معمولاً در حدود ۵۰ کلمه باشد و تنها به ذکر کمک‌های مستقیم یا حمایتی اشاره کند.

### تعارض منافع

نویسندگان موظف‌اند هرگونه رابطه مالی، شخصی، دانشگاهی یا سازمانی که می‌تواند منجر به تعارض منافع در فرآیند پژوهش یا نگارش مقاله شود، به‌طور شفاف اعلام نمایند. در صورتی که هیچ‌گونه تعارض منافی وجود نداشته باشد، لازم است عبارت زیر درج شود:

"نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در رابطه با انتشار این مقاله وجود ندارد."

### منابع و سبک مرجع‌دهی

تمام منابع در مقالات نشریه باید بر اساس **سبک Harvard ارجاع داده شوند**. برای تسهیل این فرآیند، نویسندگان می‌توانند از نرم‌افزارهای مدیریت منابع مانند Word، Mendeley یا EndNote استفاده کنند. با این حال، توجه شود که استفاده از نرم‌افزارها ممکن است گاهی باعث ارجاع ناقص شود؛ بنابراین، نویسندگان موظف‌اند فهرست منابع را با دقت بررسی کرده و هرگونه نقص احتمالی را اصلاح کنند.

### ارجاع در متن

ارجاع‌دهی در متن باید به **زبان انگلیسی** انجام شود، **حتی برای منابع فارسی**. برای منابع دارای **دو نویسنده**: هر دو نام نویسندگان ذکر شود. برای منابع با **بیش از دو نویسنده**: نام نفر اول ذکر شده و سپس از "et al." در داخل پرانتز و "و همکاران" برای ارجاعات خارج از پرانتز استفاده شود، و در نهایت سال انتشار ذکر گردد. **برای نمونه:**

• ارجاع در متن به صورت خارج از پرانتز:

نتایج مشابهی توسط Sparks و همکاران (۲۰۲۵) نیز گزارش شده است.

• **ارجاع در متن به صورت داخل پرانتز:**

نتایج مشابهی توسط سایر محققان گزارش شده است (Sparks et al., 2025; Sparks and Chen, 2025, Sparks, 2025).

**ارجاع در فهرست منابع (References)**

در پایان مقاله، تمام منابع اعم از فارسی و انگلیسی باید به **زبان انگلیسی** آورده شوند. برای منابع فارسی، حتماً به منبع اصلی مراجعه کنید و ترجمه دقیق عنوان‌ها انجام شود؛ استفاده از Google Translate توصیه نمی‌شود. در پایان منابع فارسی، عبارت (in Persian) اضافه شود. منابع باید به ترتیب حروف الفبا مرتب شوند.

- ✓ **نکته ۱:** در انتهای هر مقاله، DOI اختصاصی مقاله درج شود.
- ✓ **نکته ۲:** نحوه ارجاع‌دهی به کتاب و مقاله مطابق جدول (۲) است. برای سایر منابع اطلاعاتی مانند پایان‌نامه، گزارش پژوهشی، سایت‌ها و فایل‌های چندرسانه‌ای، شیوه Harvard استفاده شود.
- ✓ **نکته ۳:** برای منابع پایان‌نامه یا رساله دکتری باید دانشگاه و شهر درج شود.
- ✓ **نکته ۴:** منابع سمینار و همایش باید تاریخ و مکان دقیق ارائه را شامل شوند. این مقالات معمولاً خلاصه‌ای از یک مقاله جامع هستند، در صورت انتشار مقاله اصلی جامع، به اصل مقاله ارجاع دهید.
- ✓ **نکته ۵:** استفاده از منابع جدید، به‌ویژه دهه اخیر، الزامی است و درصد قابل توجهی از منابع باید مربوط به ۳-۵ سال اخیر باشند، مگر برای مکانیسم‌ها و فرمول‌های ثابت که ارجاع به منبع اصلی قدیمی ضروری است.

**جدول ۱. نحوه صحیح ارجاع دهی به منابع در فهرست منابع (به سبک Harvard)**

مدرک	مثال
مقاله با ۱ نویسنده	Smith, J.M., 1974. The theory of games and the evolution of animal conflicts. <i>Journal of theoretical biology</i> , 47(1), pp.209-221. <a href="https://doi.org/10.1016/0022-5193(74)90110-6">https://doi.org/10.1016/0022-5193(74)90110-6</a>
مقاله با ۲ نویسنده	Smith, J.M. and Price, G.R., 1973. The logic of animal conflict. <i>Nature</i> , 246(5427), pp.15-18. <a href="https://doi.org/10.1038/246015a0">https://doi.org/10.1038/246015a0</a>
مقاله با ۳ نویسنده یا بیشتر	Wankmüller, F.J., Delval, L., Lehmann, P., Baur, M.J., Cecere, A., Wolf, S., Or, D., Javaux, M. and Carminati, A., 2024. Global influence of soil texture on ecosystem water limitation. <i>Nature</i> , 635(8039), pp.631-638. <a href="https://doi.org/10.1038/s41586-024-08089-2">https://doi.org/10.1038/s41586-024-08089-2</a>
مقاله فارسی <sup>۱</sup> با X نویسنده	Karimi, S., 2025. Exploring soil temperature extremes: unraveling dynamics with local and spatial machine learning models. <i>Stochastic Environmental Research and Risk Assessment</i> , pp.1-19. <a href="https://doi.org/10.1007/s00477-025-03068-z">https://doi.org/10.1007/s00477-025-03068-z</a> . (In Persian)  Zaheri Abdehvand, Z., Karimi, D., Rangzan, K. and Mousavi, S.R., 2024. Assessment of soil fertility and nutrient management strategies in calcareous soils of Khuzestan province: A case study using the Nutrient Index Value method. <i>Environmental Monitoring and Assessment</i> , 196(6), p.503. <a href="https://doi.org/10.1007/s10661-024-12665-4">https://doi.org/10.1007/s10661-024-12665-4</a> . (In Persian)
مقاله کنفرانسی	Thompson, R., 2018. Soil moisture variation under drought conditions. Paper presented at the 10th International Soil Science Conference, Berlin, Germany, 5–7 June.
پایان‌نامه و رساله دکتری	Rahimi, F., 2017 Phosphorus dynamics in calcareous soils. PhD thesis, University of Tehran, Tehran, Iran. (In Persian)
منابع الکترونیک	Soil Survey Staff. 2004. NRCS soils [Online]. Available at <a href="http://soils.usda.gov">http://soils.usda.gov</a> [verified 23 Mar. 2005]. USDA-NRCS, Washington, DC.
ارجاع به کتاب	Brady, N.C., Weil, R.R. and Weil, R.R., 2008. <i>The nature and properties of soils</i> (Vol. 13, pp. 662-710). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
ارجاع به یک فصل از کتاب	Mousavi, S.M. and Sedaghat, A., 2025. Soil Fertility Enhancement Through Biochar Technology. In <i>Biochar Revolution: Transforming Agriculture and Environment Management</i> (pp. 99-115). Cham: Springer Nature Switzerland. <a href="https://doi.org/10.1007/978-3-031-73154-9-6">https://doi.org/10.1007/978-3-031-73154-9-6</a>

کتاب چند جلدی	Marschner, P., 2012. <i>Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants</i> . Vol.3. 3rd ed. Press, New York, pp.123–145.
ارجاع به استانداردها	ISO, D., 2005. 10390; Soil Quality—Determination of pH (ISO 10390: 2005). <i>DIN Deutsches Institut für Normung eV Beuth-Verlag, Berlin</i> . Available at: xxxxxx

۱. مانند مقاله انگلیسی، فقط در انتها in Persian اضافه می‌شود.

## سایر نکات در رابطه با ارجاع‌دهی:

در صورتی که دو یا چند نویسنده مختلف دارای نام خانوادگی مشابه باشند و آثار آن‌ها در یک سال منتشر شده باشد، باید منابع در متن و فهرست منابع، با قرار دادن حروف کوچک انگلیسی (a, b, c, ...) بعد از سال انتشار از یکدیگر تفکیک شوند. این قاعده برای آثار متعدد یک نویسنده در یک سال نیز صادق است.

**مثال در متن:** (Karimi, 2018a; Karimi, 2018b)

### مثال در فهرست منابع:

Karimi, A., 2018a. Soil fertility management under arid conditions. *Journal of Soil Research*, 25(3), 145–158. <https://doi.org/10.1000/jsr.2018.01>

Karimi, A., 2018b. Phosphorus dynamics in calcareous soils. *Plant and Soil*, 430, 211–224. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3567>

۱. اگر نام نویسنده در متن ذکر شده باشد، نیازی به تکرار آن در پراکنش نیست و تنها سال انتشار ذکر می‌شود.

**مثال:** مطابق نتایج ما، Smith و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که ..... (صحیح)

مطابق نتایج ما، Smith et al (2021) نشان دادند که ..... (اشتباه)

مطابق نتایج ما، Smith و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که ..... (Smith et al., 2021) (اشتباه)

۲. حتی اگر منبع اصلی فارسی باشد، باید در متن مقاله به انگلیسی به آن ارجاع داده شود و در فهرست منابع نیز ترجمه انگلیسی همراه با پرچسب (*In Persian*) ذکر گردد. **در این مورد ذکر (In Persian) باید بعد از شناسه DOI درج گردد.**

۳. زمانی که یک مطلب به چند منبع مرتبط است، منابع باید با نقطه‌ویرگول (;) از یکدیگر جدا شوند.

۴. **مثال:** (Smith, 2020; Rezai et al., 2019; Karimi, 2018a)

۵. ترتیب منابع در فهرست منابع باید بر اساس حروف الفبای انگلیسی مرتب شود، نه بر اساس ترتیب استناد در متن.

۶. در فهرست منابع نام کتاب و عناوین نشریه‌ها باید به صورت **ایتالیک** نوشته شوند. **علاوه بر این، تمامی اسامی جنس و گونه‌ها نیز باید در متن مقاله و فهرست منابع به ایتالیک نوشته شوند.**

۷. درج DOI اختصا صی هر مقاله در پایان ارجاع‌دهی الزامی است. اگر مقاله DOI نداشته باشد، باید آدرس د ستر سی آنلاین (URL) ارائه گردد.

۸. در مورد منابعی که ماهیت چاپی دارند و DOI یا URL ندارند (مانند کتاب‌های قدیمی یا پایان‌نامه‌های داخلی)، ارائه اطلاعات کامل شامل محل نشر، ناشر، دانشگاه و شهر الزامی است.

۹. برای منابع اینترنتی، باید تاریخ دسترسی (Accessed date) نیز ذکر شود، زیرا محتوای آن‌ها ممکن است در آینده تغییر کند.

۱۰. استفاده از منابع جدید و معتبر (ترجیحاً ۳ تا ۵ سال اخیر) توصیه می‌شود. تنها در مواردی که نیاز به ارجاع به منابع کلاسیک، فرمول‌ها یا مکانیسم‌های پایه‌ای وجود دارد، می‌توان از منابع قدیمی‌تر استفاده کرد.

## مروری کلی بر نحوه تهیه و ارسال مقاله

۱. مقاله حداکثر در ۲۰ صفحه A4 با فاصله خطوط تک‌فاصله و حاشیه‌های ۲/۵ سانتی‌متر از هر طرف و به صورت تک ستونی در نرم افزار Word 2007 یا نسخه‌های بالاتر تهیه شود.

۲. مقاله باید شامل بخش‌های اصلی شامل؛ عنوان و صفحه‌ مشخصات نویسندگان، چکیده (فارسی: ساده و انگلیسی: مبسوط)، واژگان کلیدی، مقدمه، مواد و روش‌ها، نتایج، بحث، نتیجه‌گیری، و سایر موارد ذکر شده در این راهنما باشد. ارسال چکیده مبسوط انگلیسی همراه با متن مقاله الزامی است.
۳. نوع و اندازه قلم برای متن فارسی و انگلیسی باید مطابق جدول (۳) رعایت شود.
۴. پیش از نقطه (۰) و ویرگول (،) گذاشتن فاصله لازم نیست، اما پس از آن‌ها یک فاصله باید لحاظ شود.
۵. اصول نگارش زبان فارسی باید به‌طور کامل رعایت گردد و از به‌کار بردن اصطلاحات انگلیسی که معادل فارسی آن‌ها در فرهنگستان زبان فارسی مصوب شده، تا حد امکان پرهیز شود.
۶. شکل‌ها باید با کیفیت بالا و واضح برای بررسی و انتشار تهیه شوند. در صورت پایین بودن کیفیت شکل‌ها، مقاله برای اصلاح به نویسندگان بازگردانده می‌شود.
۷. ارسال فرم تعارض منافع و فرم تعهد نامه الزامی همراه با ارسال مقاله به نشریه الزامی است.
۸. تمامی مقالات پس از دریافت، توسط سردبیر و اعضای هیات تحریریه بررسی می‌شوند و در صورتی که در حوزه پوشش مجله باشند و حداقل کیفیت لازم را داشته باشند، برای ارزیابی به داوران ارسال می‌شوند. پس از دریافت رأی داوران و تأیید هیات تحریریه، مقاله در نوبت چاپ قرار می‌گیرد. توجه شود که ارسال مقاله به داوران به منزله انتشار آن نیست و انتشار مقاله تنها با تأیید داوران و اعضای هیات تحریریه امکان‌پذیر است.

### جدول ۳- خلاصه نوع قلم و اندازه مورد تأیید در نگارش مقالات

عنوان	قلم (فونت)	اندازه	نوع قلم
عنوان فارسی مقاله	B Titr	۱۴	پررنگ
عنوان انگلیسی مقاله	Times New Roman	۱۴	پررنگ
نام و نام خانوادگی مؤلفان (فارسی)	B Mita	۱۱	پررنگ
نام و نام خانوادگی مؤلفان (انگلیسی)	Times New Roman	۱۲	پررنگ
آدرس سازمانی نویسندگان (فارسی)	B Mita	۱۰	نازک
پست الکترونیکی نویسندگان (فارسی)	Times New Roman	۸	نازک، آبی رنگ
آدرس سازمانی نویسندگان (انگلیسی)	Times New Roman	۹	نازک
عنوان اصلی بخش‌ها	B Titr	۱۲	پررنگ
عنوان زیر بخش‌ها	B Titr	۱۱	پررنگ
متن چکیده فارسی	B Mita	۱۱	نازک
متن چکیده انگلیسی	Times New Roman	۹	نازک
کلیدواژه‌های فارسی	B Mita	۱۰	نازک و ایتالیک
کلیدواژه‌های انگلیسی	Times New Roman	۹	نازک
متن اصلی <sup>۱</sup>	B Mita	۱۳	نازک
زیرنویس فارسی	B Mita	۱۰	نازک
زیرنویس لاتین	Times New Roman	۸	نازک
عنوان فارسی جدول‌ها و شکل‌ها <sup>۱</sup>	B Mita	۱۱	نازک
عنوان انگلیسی جدول‌ها و شکل‌ها <sup>۱</sup>	Times New Roman	۹	نازک
عنوان ستون‌های جدول‌ها	B Mita	۱۰	پررنگ
متون فارسی درون جدول‌ها	B Mita	۱۰	نازک

متون لاتین درون جدول‌ها	Times New Roman	۸	نازک
فهرست منابع (باید انگلیسی باشد)	Times New Roman	۱۱	نازک

۱. کلمات انگلیسی در متن فارسی باید با قلم Times New Roman و با دو اندازه کوچکتر از متن فارسی نوشته شوند.
۲. کلمه عنوان و شماره باید پررنگ باشد.

## راهنمای پاسخ به نظرات داوران

۱. نویسنده/نویسندگان موظف‌اند حداکثر ظرف ۱۵ روز پس از دریافت نظرات داوران، اصلاحات لازم را انجام داده و فایل مقاله اصلاح شده را به همراه فایل پاسخ به داوران ارسال نمایند.
۲. در پاسخ به نظرات داوران، لازم است تمامی نظرات و پیشنهادات علمی به‌طور کامل در نسخه خطی اعمال شوند؛ مگر در مواردی که دلیل علمی و منطقی برای عدم اعمال آن وجود داشته باشد، که در اینصورت نویسنده باید در فایل پاسخ به داوران آن را ارائه دهد.
۳. نویسندگان باید یک فایل جداگانه با عنوان "**پاسخ به داوران**" تهیه کنند. در این فایل، نظر هر داور به‌صورت شماره‌گذاری شده ذکر گردد و بلافاصله پاسخ نویسنده با جزئیات کامل ارائه شود. در پاسخ‌ها باید دقیقاً مشخص شود که اصلاح مربوطه در کدام بخش نسخه خطی (ذکر شماره صفحه) اعمال شده است. در صورت عدم اعمال برخی نظرات، باید توضیح و دلیل کافی ذکر شود.
۴. نویسندگان باید پیشنهادات و نظرات داوران را به‌صورت تفکیک شده پاسخ دهند، در فایل پاسخ به داوران باید به‌طور واضح مشخص باشد که هر نظر مربوط به کدام داور است. برای این کار بهتر است ابتدا تمام نظرات داور ۱، سپس نظرات داوران بعدی به ترتیب ارائه شود تا روند بررسی مجدد با سهولت و بدون ابهام صورت گیرد. برای این کار، بهتر است در فایل پاسخ داوران، ابتدا یک تیتر تحت عنوان "**پاسخ به نظرات داور x**" تعریف شود و در ادامه نظرات آن داور و پاسخ نویسندگان به‌صورت زیر ارائه شود.

\*\* توصیه می‌شود ابتدا متن نظر داور (کامنت) با قلم B Mitra، اندازه ۱۲ و با حالت ایتالیک درج شود. سپس پاسخ نویسنده با قلم B Mitra، اندازه ۱۲ و به رنگ آبی نوشته شود. این روش باعث سرعت‌بخشیدن به روند داوری و جلوگیری از هرگونه ابهام می‌گردد.

### نمونه فرمت:

#### پاسخ به نظرات داور ا:

**کامنت ۱:** هر نظر یا پیشنهادی که داور ارائه است (قلم B Mitra، اندازه ۱۲ و ایتالیک).

**پاسخ ۱:** پاسخ کامل نویسنده به این کامنت (صفحه x، بخش x). (قلم B Mitra، اندازه ۱۲ و به رنگ آبی).

**کامنت ۲:** هر نظر یا پیشنهادی که داور ارائه است (قلم B Mitra، اندازه ۱۲ و ایتالیک).

**پاسخ ۲:** پاسخ کامل نویسنده به این کامنت (صفحه x، بخش x). (قلم B Mitra، اندازه ۱۲ و به رنگ آبی).

\*\* تأکید می‌شود که همه نظرات داوران به‌صورت تک به تک در فایل پاسخ داوری مشخص شده و به آنها پاسخ مناسب داده شود. مگر اینکه داور بر اصلاح موارد نگارشی و املائی کامنت گذاشته باشد.

۵. تمامی اصلاحات در متن مقاله باید با استفاده از گزینه **Track Changes** در نرم‌افزار Word اعمال شوند. علاوه بر این، متن اصلاحی باید با رنگ آبی و زیر خط‌دار مشخص گردد تا امکان بررسی دقیق‌تر و سریع‌تر برای داوران و هیئت تحریریه فراهم شود. بنابراین، هم استفاده از Track Change و هم رنگی و زیر خط‌دار کردن متن اصلاحی، جهت سهولت بررسی مجدد، ضروری است.

## برخی نکات مهم ویرایشی

۱. برای شماره‌گذاری از عدد و نقطه استفاده شود؛ مانند شماره‌گذاری همین بخش.
۲. در تهیه مقاله از هدینگ‌گذاری و شماره‌گذاری استفاده نکنید.
۳. قبل از نقطه، ویرگول، نقطه ویرگول، دوقطه، علامت سؤال، علامت تعجب و... نیازی به فاصله نیست؛ اما بعد از این علائم باید یک فاصله گذاشته شود.
۴. هنگام استفاده از پراوترز قبل از باز شدن پراوترز و بعد از بسته شدن پراوترز از فاصله استفاده کنید، کلمه داخل پراوترز بدون فاصله به پراوترز می‌چسبد.
۵. برای نوشتن کلمات مرکب یا بعضی افعال و واژگان مشابه از نیم‌فاصله استفاده شود (برای مثال انسان‌ها، می‌رود، تصمیم‌گیری، اندازه‌گیری، بهره‌مند، منطقه‌ای، همان‌گونه و...) [برای مثال می‌خواهم (غلط) - می‌خواهم (درست)] برای ایجاد نیم‌فاصله در نرم‌افزار WORD الزماً و حتماً از (ctrl + shift + 2) استفاده شود.
۶. به جای استفاده از علامت (%) در متن از کلمه درصد استفاده شود (مانند ۲۵ درصد).
۷. براساس دستورالعمل جدید فرهنگستان زبان و ادب فارسی از به‌کار بردن (ه‌ی) خودداری گردد و در موارد لازم از سر یا (ه) استفاده شود.

## نکات ضروری

۱. از ذکر عناوینی مانند مرتبه علمی (استاد، دانشیار، دانشجو)، مهندس، دکتر و... در ابتدای اسامی نویسندگان خودداری شود.
۲. مقالات ارسالی توسط اعضای هیات علمی آموزشی و پژوهشی دانشگاه‌ها و مؤسسات تحقیقاتی باید از طریق ایمیل سازمانی یا دانشگاهی آنان ارسال گردد.
۳. درج شناسه پژوهشگر (ORCID ID) برای تمامی نویسندگان الزامی است.
۴. ارائه شماره تلفن و نشانی ایمیل معتبر برای تمامی نویسندگان الزامی است. نویسندگانی که پاسخگو به تماس‌ها و مکاتبات نباشند، مقاله آن‌ها از فرآیند داوری خارج و رد خواهد شد.
۵. ترتیب ورود اسامی نویسندگان در سامانه باید دقیقاً مطابق با ترتیب ذکر شده در فایل مشخصات نویسندگان باشد.
۶. **در صورت امکان، نویسندگان پیش از ارسال مقاله، نسخه نهایی را با استفاده از نرم‌افزارهای مشابهت‌یابی معتبر بررسی کنند. میزان مشابهت مجاز حداکثر ۲ درصد از هر منبع است. مجموع میزان مشابهت نباید از ۲۰ درصد بیشتر باشد.** در این مورد، ارائه گواهی به نشریه پژوهش‌های خاک الزامی نیست، زیرا میزان مشابهت توسط نشریه انجام می‌شود و در صورت مغایرت، مقاله برای ادامه روند انتشار در نظر گرفته نمی‌شود.
۷. نویسندگان می‌توانند حداکثر پنج داور متخصص در زمینه مرتبط با موضوع مقاله معرفی کنند. این داوران نباید از همکاران یا هم‌نویسندگان مقالات مشترک در پنج سال اخیر باشند. انتخاب نهایی داوران توسط هیات تحریریه نشریه انجام خواهد شد.

## اخلاق پژوهش و انتشار

نشریه پژوهش‌های خاک به اصول اخلاقی در پژوهش و انتشار پایبند است و کلیه نویسندگان ملزم به رعایت استانداردهای بین‌المللی اخلاق نشر مطابق با دستورالعمل کمیته بین‌المللی اخلاق نشر (COPE) هستند. ارسال مقاله به نشریه به منزله تأیید موارد زیر است:

۱. **اصالت مقاله:** مقاله باید حاصل پژوهش اصیل نویسندگان باشد و قبلاً در هیچ نشریه داخلی یا خارجی منتشر نشده و همزمان به نشریه دیگری ارسال نشده باشد.
۲. **مسئولیت نویسنده‌گان:** همه نویسندگان باید در طراحی، اجرا، تحلیل یا نگارش پژوهش نقش مؤثر داشته باشند. درج نام کسانی که مشارکت علمی نداشته‌اند (Gift Authorship) یا حذف افراد مشارکت‌کننده (Ghost Authorship) خلاف اصول اخلاقی است.

۳. **تعارض منافع:** نویسندگان موظفاند هرگونه منافع مالی، شخصی یا سازمانی که می‌تواند بر نتایج پژوهش یا تفسیر آنها اثر بگذارد را به صورت شفاف در فرم تعارض منافع اعلام نمایند.
۴. **تأیید منابع مالی و حمایتی:** در صورت استفاده از حمایت مالی یا پشتیبانی سازمانی، باید در بخش «تقدیر و تشکر» مقاله ذکر شود.
۵. **سرقت علمی و مشابهت‌یابی:** مقالات قبل از ارسال به داوران توسط نرم‌افزار مشابهت‌یاب بررسی می‌شوند. هرگونه سرقت علمی، تحریف داده‌ها یا استفاده بدون استناد مناسب به منابع، منجر به رد فوری مقاله و اطلاع‌رسانی به نهادهای ذی‌ربط خواهد شد.
۶. **داده‌ها و مستندات:** نویسندگان باید در صورت نیاز، داده‌های خام پژوهش را در اختیار هیات تحریریه قرار دهند و در نگهداری داده‌ها پس از انتشار مسئول هستند.
۷. **اصلاح یا پس‌گرفتن مقاله:** در صورت مشاهده خطاهای اساسی علمی یا اخلاقی پس از انتشار، نشریه حق دارد مقاله پس بگیرد (Retraction) و موضوع را اطلاع‌رسانی نماید.

**\*\* همچنین همه نویسندگان باید تأیید کنند که:**

- در طراحی، اجرا یا نگارش پژوهش مشارکت داشته‌اند.
- با نسخه نهایی مقاله موافق بوده و آن را تأیید کرده‌اند.
- مقاله به‌طور همزمان به نشریه دیگری ارسال نشده است.

### فرایند داوری و زمان‌بندی عمومی

مقالات دریافت‌شده در نشریه پژوهش‌های خاک پس از بررسی اولیه توسط سردبیر از نظر انطباق با اهداف و حوزه نشریه، وارد فرایند داوری همتا می‌شوند. این نشریه از شیوه داوری دوسوکور (Double-Blind Peer Review) استفاده می‌کند؛ بدین معنا که هویت داوران و نویسندگان برای یکدیگر محرمانه خواهد بود.

فرایند داوری به‌طور معمول شامل مراحل زیر است:

۱. بررسی اولیه که در این مرحله، مقاله از نظر انطباق با راهنمای نویسندگان، کیفیت نگارشی، ساختار مقاله و شباهت‌یابی (plagiarism check) ارزیابی می‌شود. در صورت عدم تطابق با استانداردها، مقاله بدون ارسال به داوری **عدم پذیرش شده** و یا برای اصلاحات بیشتر به نویسندگان بازگردانده خواهد شد.
۲. مقالاتی که مرحله بررسی اولیه را با موفقیت طی کنند، برای **انطباق با حوزه و چشم‌انداز نشریه و همچنین بررسی نوآوری و کیفیت مطالب، به هیئت تحریریه** ارجاع داده می‌شوند تا در مورد آنها تصمیم‌گیری شود.
۳. در صورت انطباق با فرمت نشریه، مقاله حداقل برای دو داور متخصص ارسال می‌شود و در صورت نیاز، داور سوم نیز تعیین خواهد شد.
۴. داوران نظرات علمی خود را در خصوص کیفیت پژوهش، نوآوری، روش‌شناسی، تحلیل داده‌ها و اعتبار نتایج ارائه می‌دهند.
۵. بر اساس نظرات داوران، مقاله می‌تواند در یکی از حالت‌های «پذیرش»، «پذیرش با اصلاحات جزئی»، «بازنگری کلی» یا «عدم پذیرش مقاله» قرار گیرد. در صورت نیاز به اصلاحات، نویسندگان موظفاند نسخه اصلاح شده را همراه با پاسخ تفصیلی به داوران ارسال کنند.

۶. پس از اعمال اصلاحات، مقاله توسط داوران یا سردبیر مجدداً بررسی و در صورت تأیید، پذیرش نهایی صادر می‌شود. مقالات پذیرفته شده، پس از طی اصلاحات نهایی و تأیید ویراستاری علمی و فنی، در صف انتشار قرار می‌گیرند. زمان بندی دقیق انتشار بسته به حجم مقالات پذیرفته شده و برنامه انتشار مجله تعیین خواهد شد.

زمان بندی عمومی فرایند:

- بررسی اولیه مقاله: بین ۲ تا ۷ روز
- ارسال به داوری و دریافت نظرات: ۲ تا ۴ هفته
- بازنگری نویسندگان: حداکثر ۱۵ روز (برای اصلاحات جزئی) یا ۲۰ روز (برای بازنگری اساسی)
- بررسی مجدد و تصمیم نهایی: ۱ تا ۳ هفته

**\*\* در مجموع، بسته به کیفیت اولیه مقاله و میزان اصلاحات مورد نیاز، فرایند داوری و پذیرش معمولاً بین ۱ تا ۲ ماه زمان خواهد برد.**

### هزینه‌ها، حق نشر و دسترسی آزاد

۱. **کمک هزینه برر سی و داوری:** برای انجام مراحل داوری و ویرایش اولیه هر مقاله، مبلغ **۲۰۰۰۰،۰۰۰ ریال (دویست هزار تومان)** از نویسنده(گان) دریافت می‌شود. این مبلغ باید همزمان با ارسال مقاله برای داوری پرداخت گردد.
۲. **کمک هزینه انتشار مقاله پذیرفته شده:** در صورت پذیرش مقاله، مبلغ **۲۰۰۰۰،۰۰۰ ریال (دویست هزار تومان)** دیگر برای تأمین بخشی از هزینه‌های انتشار از نویسنده(گان) دریافت خواهد شد. بنابراین، مجموع هزینه‌های مربوط به بررسی و چاپ هر مقاله **۴۰۰۰۰،۰۰۰ ریال (چهارصد هزار تومان)** خواهد بود.
۳. **حق نشر:** حق نشر مقاله پس از انتشار همچنان با رعایت قوانین مجله، متعلق به نشریه است.
۴. **دسترسی به مقالات:** مقالات پذیرش شده در نشریه پژوهش‌های خاک، برای همه خوانندگان به صورت رایگان و بدون محدودیت قابل دسترس خواهد بود.
۵. **استفاده و ارجاع به مقاله:** پس از انتشار، استفاده از مطالب مقاله توسط دیگران با ذکر منبع اصلی مجاز است، مشروط بر رعایت قوانین اخلاق نشر و ارجاع‌دهی صحیح.

### چک لیست ارسال:

نویسندگان هنگام ارسال مقاله به نشریه «پژوهش‌های خاک» باید موارد زیر را بررسی و تکمیل نمایند:

#### ۱. نسخه کامل مقاله

- ✓ مقاله مطابق فرمت و ساختار نشریه (حداکثر ۲۰ صفحه، فاصله خطوط ۱، حاشیه ۲/۵ سانتی‌متر، تک ستونی) آماده شده باشد.
- ✓ شامل تمامی بخش‌های اصلی مقاله (عنوان، چکیده فارسی و انگلیسی، مقدمه، مواد و روش‌ها، نتایج، بحث، نتیجه‌گیری، منابع و پیوست‌ها) باشد.

#### ۲. چکیده مفصل به زبان انگلیسی

- ✓ ارسال چکیده انگلیسی همراه مقاله الزامی است.

#### ۳. فرم تعهدنامه نویسندگان

- ✓ تکمیل و امضا شده توسط همه نویسندگان مقاله.

#### ۴. نامه درخواست چاپ مقاله

- ✓ شامل درخواست رسمی نویسنده مسئول و ذکر اطلاعات تماس.
- ۵. **فایل پاسخ به داوران (در صورت بازبینی مقاله پس از داوری)**
  - ✓ شامل پاسخ تک‌به‌تک به تمام نظرات و پیشنهادات داوران با ذکر شماره صفحه و خط اصلاح شده.
  - ✓ پاسخ‌ها با رنگ متفاوت (مثلاً آبی) مشخص شده و همه اصلاحات در متن با Track Changes اعمال شده باشد.
- ۶. **مدارک پرداخت هزینه‌ها (در صورت ارسال مقاله برای داوری یا پذیرش)**
  - ✓ پرداخت کمک هزینه داوری و ویرایش اولیه (۲۰۰ هزار تومان)
- ۷. **فایل‌های ضمیمه دیگر**
  - ✓ جداول و شکل‌ها با کیفیت مناسب (حداقل ۳۰۰ dpi)
  - ✓ هر فایل اضافی مانند پیوست داده‌ها، تصاویر تکمیلی یا اطلاعات مربوط به منابع خاص.

□ فرم تعهدنامه

□ نشریه پژوهش‌های خاک

اینجانب..... نویسندهٔ مسئول و مکاتبه‌کنندهٔ مقاله با عنوان:

"....." متعهد می‌گردم:

۱. کلیهٔ نویسندگان مقاله حاضر از ارسال آن به نشریه پژوهش‌های خاک آگاه بوده و با آن موافقت کامل دارند.

۲. این مقاله تا کنون به هیچ مجله داخلی یا خارجی ارسال نشده است.

۳. تا تعیین وضعیت نهایی در نشریه حاضر، منحصراً در اختیار این نشریه باقی خواهد ماند.

۴. نام تمامی اساتید راهنما، مشاوران و همکاران مؤثر در مقاله درج شده باشد. لازم به ذکر است پس از ارسال مقاله به نشریه، هیچگونه حذف، اضافه و تغییر در ترتیب اسامی نویسندگان امکان‌پذیر نخواهد بود.

\* در غیر این صورت، دفتر نشریه از ادامهٔ بررسی مقاله معذور خواهد بود. همچنین، در صورت احراز هرگونه تخلف در موارد فوق (حتی بعد از انتشار)، نشریه حق بازپس‌گیری مقاله را برای خود محفوظ می‌دارد.

**حق کپی رایت و انتشار:** نشریه پژوهش‌های خاک دارای دسترسی آزاد بوده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution 4.0

International License منتشر می‌شود. بر اساس این مجوز، اجازهٔ استفاده، تکثیر، بازآفرینی، بازترکیب و انتشار محتوا با ذکر منبع برای همگان آزاد است.

امضاء نویسندهٔ مسئول:

تاریخ:

**تأییدیهٔ نویسندگان**

۱. اینجانب..... نویسندهٔ اول مقاله ضمن مطالعه و تأیید محتوای مقاله حاضر، با ارسال آن به نشریهٔ پژوهش‌های خاک موافقت می‌نمایم.

امضاء:

تاریخ:

۲. اینجانب..... نویسندهٔ دوم مقاله ضمن مطالعه و تأیید محتوای مقاله حاضر، با ارسال آن به نشریهٔ پژوهش‌های خاک موافقت می‌نمایم.

امضاء:

تاریخ:

۳. اینجانب..... نویسندهٔ سوم مقاله ضمن مطالعه و تأیید محتوای مقاله حاضر، با ارسال آن به نشریهٔ پژوهش‌های خاک موافقت می‌نمایم.

امضاء:

تاریخ:

۴. اینجانب..... نویسندهٔ چهارم مقاله ضمن مطالعه و تأیید محتوای مقاله حاضر، با ارسال آن به نشریهٔ پژوهش‌های خاک موافقت می‌نمایم.

امضاء:

تاریخ:

۵. اینجانب..... نویسندهٔ پنجم مقاله ضمن مطالعه و تأیید محتوای مقاله حاضر، با ارسال آن به نشریهٔ پژوهش‌های خاک موافقت می‌نمایم.

امضاء:

تاریخ:

(( اسامی داوران مقالات جلد ۳۹ شماره ۳ سال ۱۴۰۴ مجله پژوهش های خاک ))

تعداد داوری	اسامی داوران
۱	دکتر شاهین اوستان
۱	دکتر حسین بشارتی
۳	دکتر محمدسعید تدین
۶	دکتر میثم چراغی
۱	دکتر سمیه دهقانی
۱	دکتر فرهاد رمضانی
۱	دکتر احسان سرلکی
۱	دکتر سعید سعادت
۲	دکتر علی شهریاری
۱	دکتر جهانشاه صالح
۴	دکتر ارژنگ فتحی گردلیدانی
۲	دکتر مصطفی مارزی
۲	دکتر مجید موسوی
۳	دکتر یوسف هاشمی نژاد
۱	دکتر یعقوب حسینی
۱	دکتر نفیسه یغمائیان



## Assessment of Soils Salinity Status in Pomegranate Orchards of Saveh

Mohammad Ali Khodshenas<sup>a,\*</sup> , and Javad Ghadbeyklou<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Soil and Water Department, Markazi Agricultural and Resources Research and Training Center, AREEO, Arak, Iran.

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Research Article

#### Received

July 28, 2025

#### Revised

September 28, 2025

#### Accepted

October 15, 2025

#### Published online

December 20, 2025

#### Keywords

Calcium carbonate equivalent,  
Pomegranate,  
Saveh,  
Soil salinity,  
Sodium adsorption ratio.

#### \*Corresponding author's email

[khodshenasm@gmail.com](mailto:khodshenasm@gmail.com)

### EXTENDED ABSTRACT

**Background and Objectives:** Iran, the third-largest pomegranate producer in the world, possesses one of the richest genetic reservoirs of this crop, with approximately 800 identified genotypes. Saveh is among the most important pomegranate-producing regions in Iran and contributes significantly to the national production and export of the fruit. However, the arid to semi-arid climate of the area and declining precipitation have led to salt accumulation in the soil, resulting in salinization and a tendency toward sodicity. Besides reducing growth and yield, salinity negatively affects fruit quality. Assessing the current status of soil salinity and the risk of sodicity is therefore essential for the sustainable management of pomegranate orchards in the region.

**Materials and Methods:** This study was conducted in the pomegranate orchards of Saveh. After georeferencing the orchards and preparing a base map, soil samples were taken from the 0–60 cm depth. A total of 23 samples were collected and transferred to the laboratory, where the following chemical properties were determined: pH and electrical conductivity (EC) of the saturation paste, calcium-carbonate equivalent (CCE), soluble  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , and  $\text{SO}_4^{2-}$ , and the sodium adsorption ratio (SAR). Descriptive statistics were used for data analysis. For spatial modeling of salinity, log-transformed data were interpolated by ordinary kriging. A spherical variogram (nugget = 1.5, sill = 18, range  $\approx$  8 km) was selected as the best-fit model, and its performance was validated by cross-validation.

**Results:** Results showed that 65.2% of the samples were non-saline, whereas 34.8% fell into the saline class. Mean ECe was  $4.08 \text{ dS m}^{-1}$ , mean pH 7.8, and mean CCE was 22.02%. Strong positive correlations were observed between soluble  $\text{Na}^+$  and  $\text{HCO}_3^-$  and the ECe. Average concentrations of  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , and  $\text{HCO}_3^-$  in the saturation extract were 20.41, 18.25, and 2.16  $\text{meq L}^{-1}$ , respectively. According to the salinity zoning map, 7,000 ha of the studied area are classified as salt-affected, implying a substantial limitation to sustainable pomegranate production.

**Conclusion:** Although a considerable portion of the orchard soils in Saveh currently suffers from salinity, the risk of sodicity remains low. Continuous monitoring of  $\text{Na}^+$  and  $\text{HCO}_3^-$  concentrations is nevertheless recommended to prevent future structural degradation and fertility decline.

**Cite this article:** Khodshenas, M.A, Ghadbeyklou, J., 2025. Assessment of soils salinity status in pomegranate orchards of Saveh. *Journal of Soil Research*, 39 (3), pp. 247-262.



DOI: [10.22092/IJSR.2025.370194.783](https://doi.org/10.22092/IJSR.2025.370194.783)

Publisher: Soil Science Society of Iran



## شناخت وضعیت شوری خاک باغ‌های انار ساوه

محمدعلی خودشناس<sup>۱\*</sup>  و جواد قدبیک‌لو<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اراک، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۶</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۰۶</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۳</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۲۹</p> <p>واژه‌های کلیدی انار، ساوه، شوری خاک، کربنات کلسیم معادل، نسبت جذب سدیم.</p> <p>* ایمیل نویسنده مسئول <a href="mailto:khodshenasm@gmail.com">khodshenasm@gmail.com</a></p>	<p>شوری خاک یکی از مهم‌ترین چالش‌های تولید پایدار انار (<i>Punica granatum L.</i>) در شهرستان ساوه به شمار می‌رود. قرارگیری این منطقه در اقلیم خشک و نیمه‌خشک، شرایط را برای تجمع نمک‌ها و سدیمی شدن خاک فراهم کرده است که می‌تواند اثرات منفی قابل‌توجهی بر رشد درختان، کاهش عملکرد و افت کیفیت میوه انار بر جای گذارد. با توجه به اهمیت این موضوع، پژوهش حاضر با هدف بررسی وضعیت شوری و خطر سدیمی خاک باغ‌های انار منطقه انجام شد. در این مطالعه از ۲۳ باغ انار نمونه‌برداری خاک انجام شد. ویژگی‌هایی مانند هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع، اسیدیته، کربنات کلسیم معادل، بافت، سدیم، کلسیم و منیزیم، کلر محلول، سولفات و نسبت جذب سدیم اندازه‌گیری شده و داده‌ها با استفاده از آمار توصیفی، تحلیل شد. ضریب همبستگی ویژگی‌ها تعیین و هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع خاک‌های مورد مطالعه با استفاده از روش درون‌یابی مکانی پهنه‌بندی شد. نتایج نشان داد که میانگین هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع خاک‌ها ۴/۰۸ دسی‌زیمنس بر متر بود. میانگین اسیدیته خاک‌ها ۷/۸ و میانگین کربنات کلسیم معادل ۲۲/۰۲ درصد بود. همبستگی بالایی بین سدیم و بی‌کربنات محلول با هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع مشاهده شد. میانگین کلر، سولفات و بی‌کربنات به ترتیب ۲۰/۴۱، ۱۸/۲۵ و ۲/۱۶ میلی‌اکی‌والان بر لیتر بود. ۶۵/۲ درصد از خاک‌های مورد مطالعه از نظر شوری و سدیمی بودن فاقد محدودیت بود. بر اساس نقشه پهنه‌بندی ۷۰۰۰ هکتار از اراضی مورد مطالعه در گروه خاک‌های شور قرار گرفت که بیانگر وجود محدودیت برای تولید پایدار محصول است. بر اساس یافته‌های این تحقیق، می‌توان نتیجه گرفت که اگرچه بخشی از خاک‌های باغ‌ها انار شهرستان ساوه با مشکل شوری مواجه هستند، اما خطر سدیمی شدن پایین است؛ بنابراین، استفاده از راهکارهای مدیریتی نظیر بهبود روش‌های آبیاری، اصلاح خاک و مدیریت بهینه تغذیه گیاهی می‌تواند در کاهش اثرات منفی شوری و پایداری تولید انار نقش مؤثری ایفا نماید.</p>

استناد: خودشناس، م.ع.، قدبیک‌لو، ج.، ۱۴۰۴. شناخت وضعیت شوری خاک باغ‌های انار ساوه. مقاله پژوهشی، نشریه پژوهش‌های خاک، (۳)، ۳۹، ۲۴۷-۲۶۲.

DOI: 10.22092/IJSR.2025.370194.783



## مقدمه

ایران به عنوان سومین تولید کننده انار در جهان پس از هند و چین، با دارابودن حدود ۸۰۰ ژنوتیپ انار، غنی‌ترین ذخیره ژنتیکی این محصول را در اختیار دارد (UNECE, 2022). تغییرات الگوهای اقلیمی تأثیرات چشمگیری بر مناطق کشاورزی، به‌ویژه مناطق خشک، نیمه‌خشک و ساحلی داشته و موجب افزایش شوری خاک شده است (Corwin, 2021). با توجه به قرارگیری بخش قابل‌توجهی از اراضی کشاورزی کشور در مناطق خشک و نیمه‌خشک حاشیه کویر مرکزی، موضوع شوری خاک به چالشی جدی برای تولید پایدار انار تبدیل شده است.

بر اساس آمار وزارت جهاد کشاورزی، ساوه به عنوان یکی از قطب‌های اصلی تولید انار کشور با سطح زیرکشت ۱۰۴۶۰ هکتار و متوسط عملکرد ۱۰ تن در هکتار می‌باشد (Ministry of Agriculture Jihad of Iran, 2022). مناطق انار کاری ساوه با مشکل شوری خاک روبرو است که بر کمیت و کیفیت محصول تولید شده تأثیر منفی قابل توجهی دارد. باتوجه‌به ارزش غذایی و دارویی بالای انار و نقش مهم آن در اقتصاد کشاورزی مناطق مرکزی ایران، مدیریت شوری خاک در باغ‌ها انار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. افزایش شوری موجب کاهش قند، افزایش اسیدیته و کاهش مواد مؤثره دارویی در میوه انار می‌شود (Zaouay et al., 2012). باتوجه به پیش‌بینی‌های تغییر اقلیم و کاهش بارندگی در مناطق مرکزی، توجه به مسئله شوری خاک در باغ‌های انار نه تنها یک ضرورت فنی، بلکه اقدامی استراتژیک برای حفظ امنیت غذایی و توسعه پایدار کشاورزی در این مناطق محسوب می‌شود که در گزارش ششم (AR6) گروه کاری اول (WG1) و همچنین در گزارش گروه کاری دوم (WG2) هیئت بین‌دولتی تغییرات اقلیمی آمده است (IPCC, 2021). انار در گروه گیاهان نیمه متحمل به شوری طبقه‌بندی می‌شود. آستانه تحمل شوری برای انار حدود ۳/۴ دسی‌زیمنس بر متر است و هر واحد افزایش شوری بیش از این حد می‌تواند تا ۱۰ درصد از عملکرد محصول بکاهد (Maas and Hoffman, 1977).

Holland و همکاران (۲۰۰۹) مکانیسم‌های فیزیولوژیک تحمل به شوری در انار را بررسی کردند. یافته‌های ایشان نشان داد که درختان انار از طریق مکانیسم‌هایی مانند دفع نمک از طریق برگ‌ها، تنظیم اسمزی با تجمع ترکیباتی مانند پرولین و گلیسین بتائین و تغییرات آناتومیکی مانند ضخیم‌شدن کوتیکول برگ به شرایط شوری پاسخ می‌دهند. این مطالعه همچنین ارقام مقاوم به شوری مانند واندرفول و مولا را معرفی نمود. Karimi و Mirdehghan (۲۰۱۳) رابطه بین شوری خاک و کیفیت میوه انار را در استان کرمان بررسی کردند.

یافته‌های ایشان نشان داد که شوری بالای ۵ دسی‌زیمنس بر متر موجب کاهش ۲۵ درصدی محتوای قند، افزایش ۴۰ درصدی اسیدیته و کاهش ۳۵ درصدی آنتوسیانین میوه می‌شود. این پژوهش همچنین تأثیر مثبت کاربرد سولفات پتاسیم در کاهش اثرات منفی شوری را نشان داد. مطالعات متعددی نشان دادند که آبیاری درختان انار با آب شور، به‌ویژه در سطوح هدایت الکتریکی بالاتر از ۶ دسی‌زیمنس بر متر، موجب کاهش رشد رویشی، عملکرد میوه و کیفیت محصول می‌شود. این کاهش با افزایش شوری شدت می‌یابد و به‌دلیل تجمع یون‌های سدیم و کلر در بافت گیاه و اختلال در جذب عناصر غذایی ضروری است (Mirdehghan and Rahemi, 2015).

(Mastrogiannidou et al., 2016).

Minhas و همکاران (۲۰۲۰) عنوان نمودند که مقابله با شوری خاک و آب به عنوان چالشی جهانی در تولیدات کشاورزی، نیازمند استراتژی‌های هوشمندانه در مدیریت منابع آب و خاک است. آنان راهکارهای علمی برای تعدیل اثرات شوری بر تبخیر-تعرق گیاهی و عملکرد محصولات را بررسی نمودند. ترکیب مدل‌های محاسباتی با راهکارهای عملی مدیریتی می‌تواند راهگشای کشاورزی پایدار در مناطق شور باشد.

Mirdehghan و Rahem (۲۰۱۵) در پژوهشی اثرات شوری بر جذب عناصر غذایی در انار را بررسی کردند. یافته‌ها نشان داد که شوری ۴ دسی‌زیمنس بر متر موجب افزایش سه برابری سدیم برگ و کاهش ۵۰ درصدی جذب پتاسیم می‌شود. این مطالعه همچنین تأثیر مثبت محلول‌پاشی کلسیم کلرید در کاهش آسیب‌های ناشی از شوری را نشان داد. همچنین کاهش معنی‌دار غلظت نیتروژن و پتاسیم، کلسیم و منیزیم و افزایش کلرید برگ در شرایط خاک شور توسط Mastrogiannidou و همکاران (۲۰۱۶) و Momenpour و همکاران (۲۰۲۲) گزارش شد.

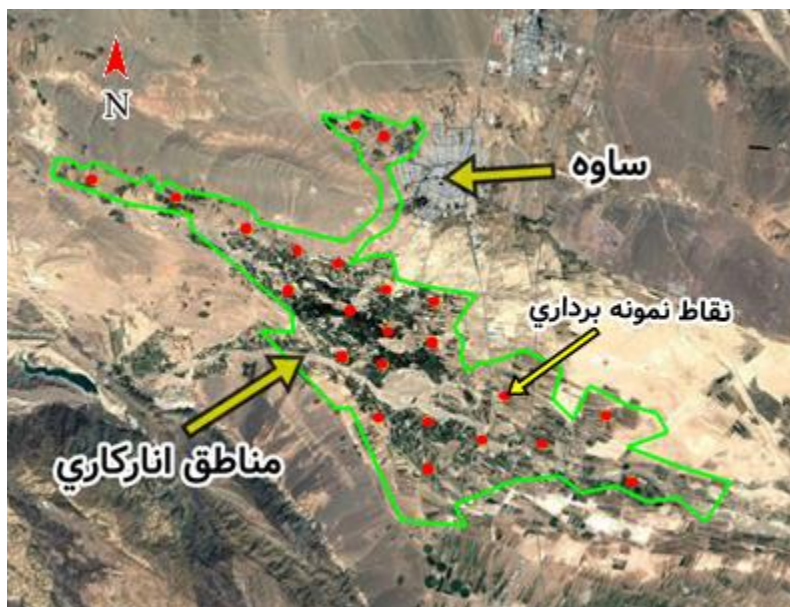
Taghizadeh-Mehrjardi و همکاران (۲۰۱۴) تغییرات شوری خاک در عصاره گل اشباع (ECe) را در محدوده‌ای به وسعت ۷۲۰۰۰ هکتار در مرکز ایران بررسی و پهنه‌بندی نمودند. ضریب تبیین ۷۸ درصد، کارآمدی روش‌های درون‌یابی جهت پهنه‌بندی شوری خاک را تأیید نمود، همچنین آن‌ها عنوان نمودند که استفاده مشابه از این روش‌ها می‌تواند در سایر مناطق ایران برای ارزیابی و مدیریت خاک‌های شور و قلیایی به کار گرفته شود.

## مواد و روش‌ها

شهر ساوه با مختصات جغرافیایی ۳۵°۱۰' شمالی و ۵۰°۲۱' شرقی، در استان مرکزی واقع شده است. این منطقه با ارتفاع متوسط ۱۱۰۰ متر از سطح دریا، در حاشیه کویر مرکزی ایران قرار

(انحراف معیار، واریانس، دامنه تغییرات)، ضرایب همبستگی بین پارامترهای مختلف اجرای آزمون‌های نرمال بودن داده‌ها، چارک‌های ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصدی و حداقل و حداکثر محاسبه شد. برای پهنه‌بندی هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع در خاک‌های مورد مطالعه، ابتدا واریوگرام تجربی داده‌های شوری محاسبه و سپس با مدل‌های نظری مناسب نظیر کروی، نمایی یا گاوسی برازش شد تا پارامترهای اساسی همچون ناهمبستگی (nugget)، آستانه (sill) و برد (range) تعیین گردد. این پارامترها مبنای اجرای کریجینگ معمولی قرار گرفتند تا بتوان مقادیر شوری را در یک شبکه منظم پیش‌بینی و نقشه‌های پیوسته شوری خاک تولید کرد. برای ارزیابی دقت مدل، اعتبارسنجی متقاطع به روش حذف تک‌به‌تک (leave-one-out) انجام و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) محاسبه شد. سپس نقشه تولیدی بر اساس طبقه‌بندی متداول شوری به پهنه‌های مدیریتی تبدیل گردید (Webster and Oliver, 2007; Goovaerts, 1997).

دارد. از نظر زمین‌شناسی، رسوبات آبرفتی حاصل از رودخانه‌های منطقه و تشکیلات مارنی و آهکی خاک‌های این ناحیه را شکل داده‌اند. ساوه دارای اقلیم نیمه‌خشک با میانگین بارندگی سالانه حدود ۲۱۰ میلی‌متر و تبخیر بالقوه بیش از ۲۵۰۰ میلی‌متر در سال است. دمای متوسط سالانه ۱۷/۵ درجه سانتیگراد و میانگین دمای ماه‌های گرم سال به ۳۵ درجه سانتیگراد می‌رسد. این شرایط اقلیمی منجر به تبخیر شدید و تجمع املاح در خاک‌های منطقه شده است. در این مطالعه از ۲۳ باغ دایر انارکاری شهرستان ساوه نمونه‌برداری مرکب خاک از عمق صفر تا ۶۰ سانتیمتر انجام و مختصات جغرافیایی نقاط نمونه برداری ثبت شد (شکل ۱). نمونه‌ها بعد از هوا خشک شدن و عبور از الک ۲ میلی‌متری استاندارد آزمایشگاه خاکشناسی تجزیه شدند. در این مطالعه ویژگی‌های شیمیایی شامل اسیدیته گل اشباع با پ هاش متر (Sparks et al., 2020)، هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع با کنداکتومتر (Rhoades, 1996)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون معکوس اسید (Loeppert and Suarez, 1996)، کلر محلول به روش تیتراسیون نیترات نقره (Richards, 1954)، سدیم محلول با استفاده از دستگاه فلیم فتومتر (Rhoades et al., 1999)، کلسیم و منیزیم محلول به روش تیتراسیون با نمک اتیلن دی آمین تترا استات سدیم (Thomas, 1996)، سولفات محلول به روش کدورت سنجی و نسبت جذب سدیم (Richards, 1954) با استفاده از رابطه  $SAR = [Na^+] / \sqrt{([Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]) / 2}$  اندازه‌گیری شد. نتایج آزمایشگاهی با نرم‌افزارهای Excel و Spss با روش آمار توصیفی تجزیه و تحلیل شد. شاخص‌های مرکزی (میانگین، میانه)، شاخص‌های پراکندگی



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی نقاط نمونه‌برداری خاک مناطق انارکاری ساوه

Figure 1. Geographical location of soil sampling sites in Saveh pomegranate orchards

#### نتایج و بحث

نتایج آماره‌های توصیفی شامل میانگین، دامنه، حداقل، حداکثر، انحراف معیار، واریانس، چولگی، کشیدگی، چارک‌های مربوط به ویژگی‌های ۲۳ نمونه خاک باغ‌های انارکاری شهرستان ساوه در جدول (۱) نمایش داده شده است. براساس نتایج به‌دست

آمده، هر یک از ویژگی‌های خاک‌های مورد مطالعه به‌ترتیب شامل هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع، اسیدیته خاک، کربنات کلسیم معادل، بافت خاک، سدیم محلول، کلسیم و منیزیم محلول، کلر محلول، سولفات محلول، بی‌کربنات محلول، نسبت جذب سدیم مورد بحث قرار می‌گیرد.

جدول ۱ - شاخص‌های آمار توصیفی خاک‌های انار کاری شهرستان ساوه  
 Table 1. Descriptive statistics of soil properties in the pomegranate orchards of Saveh

سولفات محلول (میلی‌اکی‌والان در لیتر)	بی‌کربنات محلول (میلی‌اکی‌والان در لیتر)	کلر محلول (میلی‌اکی‌والان در لیتر)	نسبت جذب سدیم	کلسیم و منیزیم محلول (میلی‌اکی‌والان در لیتر)	سدیم محلول (میلی‌اکی‌والان در لیتر)	کربنات کلسیم معادل (درصد)	اسیدیته	هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع (دسی‌زیمنس بر متر)	شاخص‌های آماری
Soluble sulfate (meq/L)	Soluble bicarbonate (meq/L)	Soluble chloride (meq/L)	Sodium Adsorption Ratio (SAR)	Soluble calcium + Magnesium (meq/L)	Soluble sodium (meq/L)	Calcium carbonate Equivalent (%)	pH	Electrical conductivity of saturated paste extract (dS/m)	Statistical index
18.25	2.16	20.41	5.92	20.82	20	22.02	7.8	4.08	Mean میانگین
31.74	3.76	35.5	5.17	36.21	34.79	21.4	0.51	7.1	Range دامنه
17.15	0.85	8	3.88	8.16	7.84	10.1	7.6	1.6	Minimum حداقل
38.89	4.61	43.5	9.05	44.37	42.62	31.5	8.1	8.7	Maximum حداکثر
11.54	1.37	12.9	1.89	13.16	12.65	7.82	0.14	2.6	Standard deviation انحراف معیار
133.07	1.87	166.49	3.58	173.22	159.9	61.13	0.02	6.7	Variance واریانس
0.75	0.75	0.75	0.55	0.75	0.75	-0.28	0.01	0.75	Skewness چولگی
-1.05	-1.05	-1.05	-1.33	-1.05	-1.05	-1.64	-0.71	-1.05	Kurtosis کشیدگی
9.16	1.09	10.25	4.39	10.45	10.04	15.25	7.71	2.05	First quartile (Q1) چارک اول
12.07	1.43	13.5	5.04	13.77	13.23	24.4	7.8	2.7	Median (Q2) چارک دوم
28.16	3.34	31.5	7.7	32.13	30.87	28.8	7.9	6.3	Third quartile (Q3) چارک سوم

جدول ۲- ضرایب همبستگی شاخص‌های شوری خاک‌های انارکاری ساوه  
 Table 2. Correlation coefficients of soil salinity indicators in pomegranate orchards of saveh

شاخص‌ها	Index	اسیدپته گل اشباع	هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع	نسبت جذب سدیمی	غلظت سدیم محلول	غلظت کلسیم و منیزیم محلول	غلظت بی‌کربنات
		pH	Electrical conductivity of saturated Paste extract	Sodium Adsorption Ratio (SAR)	Soluble sodium concentration	Soluble calcium + Magnesium concentration	Bicarbonate concentration
اسیدپته گل اشباع	1						
هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع		0.32 <sup>ns</sup>	1				
نسبت جذب سدیم		0.41*	0.99**	1			
غلظت سدیم محلول		0.45*	0.81**	0.88**	1		
غلظت کلسیم و منیزیم محلول		-0.28 <sup>ns</sup>	0.26 <sup>ns</sup>	-0.35*	-0.42*	1	
غلظت بی‌کربنات		0.39*	0.61**	0.52**	0.67**	-0.31 <sup>ns</sup>	1

\* \*\*, and ns indicate significance at the 5%, 1%, and non-significant levels, respectively

\* \*\*, و ns معنی داری به ترتیب در سطح پنج، یک و بی معنی

### هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع

میانگین هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع خاک‌ها ۴/۰۸ دسی‌زیمنس بر متر است. دامنه تغییرات از ۱/۶ تا ۸/۷ دسی‌زیمنس بر متر بود. ۲۵ درصد از نمونه‌ها هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع کمتر از ۲/۰۵، ۵۰ درصد از نمونه‌ها کمتر از ۲/۷ (میان‌ه)، ۷۵ درصد از نمونه‌ها کمتر از ۶/۳ دسی‌زیمنس بر متر دارند. انحراف معیار ۲/۶ نشان می‌دهد که پراکندگی نسبتاً زیادی در میزان شوری خاک وجود دارد. چوله به راست (۰/۷۵) نشان می‌دهد که تعداد بیشتری از نمونه‌ها دارای هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع کمتر از میانگین هستند و تعدادی نمونه با هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع بسیار بالا وجود دارند؛ به عبارت دیگر ۴۰ درصد از باغ‌های انارکاری مطالعه شده در مناطقی که شوری خاک بیش از ۴/۰۸ دسی‌زیمنس بر متر دارند و در محدوده شور و بسیار شور طبقه‌بندی می‌شوند (Richards, 1954). کشیدگی منفی (-۱/۰۴۶) نشان می‌دهد که توزیع داده‌ها نسبتاً مسطح‌تر از توزیع نرمال است. انحراف معیار بالا (۲/۵۸) نشان‌دهنده تنوع قابل توجه در هدایت الکتریکی خاک‌هاست.

میانگین هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع در این نمونه‌ها نسبتاً بالاست. برای درختان انار، هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع بالاتر از ۴ دسی‌زیمنس بر متر (آستانه تحمل به شوری انار) محدودیت

عملکرد و رشد آغاز شده و با افزایش میزان شوری تشدید می‌شود (Maas, 1993). انار جزء گیاهان با تحمل متوسط به شوری تقسیم بندی می‌شود. تحمل گیاهان به شوری در بین ارقام مختلف کاملاً متغیر است و تحت تأثیر شرایط محیطی رشد گیاه نظیر خاک و محیط می‌باشد. در مناطق سرد و مرطوب تحمل گیاهان به شوری در مقایسه با اقلیم گرم و خشک بیشتر است (Ayers and Westcot, 1985). در خاک‌های شور به علت اینکه میزان انرژی مصرفی گیاه برای جذب آب و همچنین انرژی لازم جهت تنظیم فعالیت‌های بیوشیمیایی خیلی زیادتر از خاک‌های شور می‌باشد لذا شوری خاک اثرات نامطلوبی در رشد گیاه ایجاد می‌کند (Rhoades and Loveday, 1990).

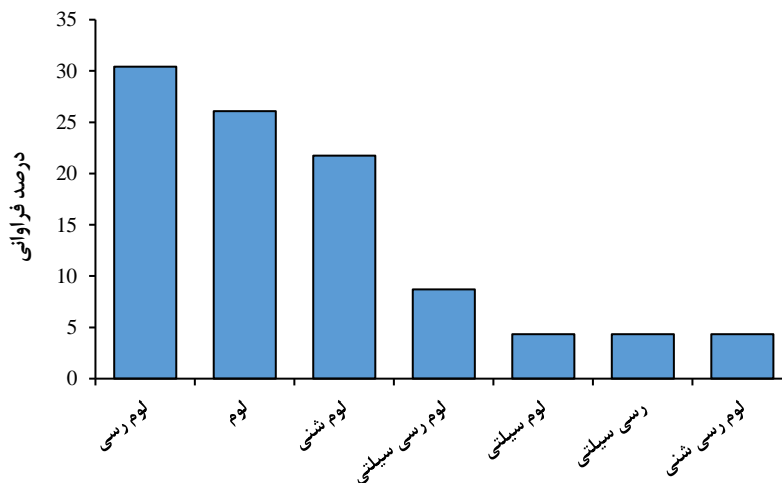
### اسیدپته خاک

میانگین اسیدپته خاک ۷/۸ است که نشان می‌دهد به دلیل وجود کربنات کلسیم بالا خاک‌ها قلیایی هستند (Mclean, 1982). دامنه تغییرات از ۷/۶ تا ۸/۱ بسیار محدود بوده و انحراف معیار پایین (۰/۱۴) نیز این یکنواختی را تأیید می‌کند. چوله نزدیک به صفر (۰/۰۱) نشان می‌دهد که توزیع اسیدپته خاک‌ها تقریباً متقارن است. کشیدگی منفی (-۰/۷۱) نشان می‌دهد که توزیع داده‌ها کمی مسطح‌تر از توزیع نرمال است. ۷۵ درصد از نمونه خاک‌ها

علت تثبیت آن در خاک آهکی و بهم خوردن تعادل یونی و کاهش جذب کلسیم و پتاسیم می‌شود (Fageria et Marschner, 2012). جهت مقابله با اثرات سوء آهک در خاک باغ‌های انار کاربرد کلات‌ها را می‌توان توصیه نمود. کلات‌ها ترکیبات پایدارتری هستند و ریز مغذی‌های فلزی را در اسیدیته بالا محلول نگه داشته و جذب آن‌ها را برای گیاه آسان می‌کنند علاوه بر کاربرد خاکی محلول‌پاشی ریز مغذی‌های کلات یا سولفات‌های آن‌ها (مانند سولفات روی، سولفات منگنز) روی شاخ و برگ، راهی سریع برای جلوگیری و رفع علائم ظاهری کمبود می‌باشد، زیرا جذب از طریق برگ سریع‌تر از جذب از طریق ریشه در خاک‌های نامساعد است (Havlin et al., 2014). در برخی موارد، افزودن مقدار کنترل شده اسید (مانند اسید نیتریک یا اسید فسفریک) به آب آبیاری می‌تواند به کاهش اسیدیته آب و همچنین کاهش اسیدیته موضعی خاک در طول زمان کمک کند و جذب عناصر غذایی را بهبود بخشد (Havlin et al., 2014; Fageria et al., 2011).

### بافت خاک

نمونه‌های خاک مورد بررسی دارای تنوع قابل توجهی از نظر بافتی هستند و در هفت کلاس بافتی مختلف طبقه‌بندی شده‌اند (شکل ۲). این کلاس‌های بافتی شامل لوم، لوم رسی، لوم شنی، لوم سیلتی رسی، رسی سیلتی، لوم سیلتی و لوم شنی رسی هستند. بیشترین فراوانی مربوط به خاک‌های لوم رسی و لوم است که نشان‌دهنده غالب بودن بافت‌های متوسط در منطقه مورد مطالعه است.



شکل ۲- درصد فراوانی کلاس‌های بافت خاک در نمونه‌های خاک باغ‌های انار ساوه

Figure 2. The frequency of soil texture classes in soil samples of Saveh pomegranate orchards

اسیدیته بین ۷/۶ و ۷/۹ دارند که نشان دهنده محدوده نسبتاً باریک اسیدیته در بیشتر نمونه‌ها است.

در اسیدیته‌های بالای ۷/۵ قابلیت جذب عناصر غذایی به‌استثنای مولیبدن کاهش می‌یابد برای مقابله با اسیدیته‌های بالا باید مقدار آهک خاک و بی‌کربنات آب آبیاری را با استفاده از مواد آلی به همراه گوگرد و اسیدی کردن آب آبیاری کاهش داد (Marschner, 2012). همچنین در خاک‌های مورد مطالعه، با استفاده از آزمون خاک بایستی غلظت عناصر غذایی تعیین و قابلیت استفاده عناصر با مصرف نوع و میزان صحیح مواد کودی مدیریت شود (Havlin et al., 2014; Brady and Weil, 2016).

### کربنات کلسیم معادل

میانگین کربنات کلسیم معادل ۲۲/۰۲ درصد و دامنه تغییرات از ۱۰/۱ تا ۳۱/۵ درصد بوده که نسبتاً وسیع است. ۵۷ درصد خاک‌های مورد مطالعه بیش از ۲۰ درصد آهک دارند که از نظر میزان آهک جزو خاک‌های آهکی تقسیم‌بندی می‌شوند (Ryan et al., 2001). انحراف معیار بالا (۷/۸۲) نشان دهنده گستردگی میزان کربنات کلسیم معادل است. چوله به چپ (۰/۲۸-) نشان می‌دهد که تعداد بیشتری از نمونه‌ها دارای کربنات کلسیم معادل بیشتر از میانگین هستند. کشیدگی منفی (۱/۶۴-) نشان می‌دهد که توزیع داده‌ها بسیار مسطح‌تر از توزیع نرمال است.

کربنات کلسیم معادل باعث افزایش اسیدیته خاک می‌شود که به نوبه خود سبب کاهش حلالیت و جذب ریز مغذی‌هایی نظیر آهن، روی، منگنز و مس قابل استفاده و بروز زردی ناشی از کمبود این عناصر و همچنین کاهش جذب فسفر قابل استفاده به

در محدوده کم‌تر تا متوسط قرار دارند. ۲۵ درصد نمونه‌ها دارای غلظت سدیم محلول کمتر از  $۱۰/۰۴$ ، ۵۰ درصد کمتر از  $۱۳/۲۳$  و ۷۵ درصد کمتر از  $۳۰/۸۷$  میلی‌اکی‌والان در لیتر بود (Corwin and Scudiero, 2019). در ۲۵ درصد نمونه‌های باقیمانده با غلظت سدیم بالا اقدامات مدیریتی شامل شستشوی خاک با آب با کیفیت مناسب، کاربرد گچ کشاورزی برای جایگزینی سدیم با کلسیم و مدیریت آبیاری برای جلوگیری از تجمع بیشتر نمک‌ها توصیه می‌شود (Minhas et al., 2020).

ضریب همبستگی هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع با سدیم همبستگی مثبت و معنی‌دار ( $۰/۸۱^{**}$ ) در جدول ۲ نشان می‌دهد که بخش زیادی از شوری خاک ناشی از تجمع سدیم است. به عبارت دیگر، افزایش شوری خاک همراه با غلبه سدیم محلول بر کلسیم و منیزیم، موجب تخریب ساختار خاک و بروز اثرات منفی سدیمی‌شدن می‌شود؛ که این می‌تواند به علت منشأ زمین‌شناسی مشترک بر اثر وجود کانی‌های حاوی سدیم، کلسیم و منیزیم مانند مونت‌موریلونیت باشد (FAO, 2016; Rengasamy, 2010).

### کلسیم و منیزیم محلول

تحلیل داده‌های مجموع کاتیون‌های کلسیم و منیزیم در ۲۳ نمونه خاک‌های انار شهرستان ساوه نشان داد که غلظت این کاتیون‌ها از  $۸/۱۶$  تا  $۴۴/۳۷$  میلی‌اکی‌والان در لیتر متغیر است. میانگین غلظت‌های اندازه‌گیری شده  $۲۰/۸۲$  با انحراف معیار  $۱۳/۱۶$  میلی‌اکی‌والان در لیتر بود که بیانگر پراکندگی نسبتاً بالای داده‌ها است. چولگی نشان می‌دهد توزیع داده‌ها به سمت مقادیر پایین‌تر از میانگین متمایل است. اگرچه برخی نمونه‌ها دارای غلظت بسیار بالایی هستند، اما بیشتر داده‌ها در محدوده کم تا متوسط قرار دارند (Sposito, 2008). ضریب کشیدگی ( $۰.۵$ ،  $-۱$ ) نیز حاکی از توزیع نسبتاً مسطح داده‌ها است. Oster و Shainberg (۱۹۷۹) عنوان نمودند که کشیدگی منفی با ناهمگنی ساختار زمین‌شناسی در ارتباط می‌باشد. ۲۵ درصد نمونه‌ها دارای غلظت مجموع کلسیم و منیزیم محلول کمتر از  $۱۰/۴۵$ ، ۵۰ درصد کمتر از  $۱۳/۷۷$  و ۷۵ درصد کمتر از  $۳۲/۱۳$  میلی‌اکی‌والان در لیتر بود که با یافته‌های Minhas و همکاران (۲۰۲۰) برای انار مطابقت دارد.

ضرایب همبستگی جدول (۲) نشان داد که غلظت مجموع کلسیم و منیزیم با غلظت سدیم محلول همبستگی منفی و معنی‌داری ( $۰/۴۲^{**}$ ) نشان داد، به این معنی که با افزایش مقادیر کلسیم و منیزیم، میزان سدیم محلول که عاملی مخرب در تخریب ساختمان خاک، کاهش نفوذپذیری و بروز مشکلات شوری-سدیمی است،

از نظر ترکیب بافتی، خاک‌های مورد مطالعه تنوع وسیعی نشان می‌دهند. درصد شن از حداقل ۱۰ درصد در برخی نمونه‌ها تا حداکثر ۷۲ درصد متغیر است. درصد سیلت نیز از ۱۴ درصد تا ۵۷ درصد و درصد رس از ۱۳ درصد تا ۴۲ درصد متغیر می‌باشد. خاک‌های لوم شنی که بیشترین درصد شن را دارند، معمولاً در نمونه‌هایی مشاهده می‌شوند که درصد شن آن‌ها بالای ۵۰ درصد است. این خاک‌ها به دلیل زهکشی مناسب و نفوذپذیری بالا، معمولاً مشکلات شوری کمتری نشان می‌دهند. در مقابل، خاک‌های با درصد رس بالا مانند رسی سیلتی که تا ۴۲ درصد رس دارند، به دلیل زهکشی ضعیف‌تر و نگهداری بیشتر نمک‌ها، مستعدتر به تجمع شوری هستند.

خاک‌های با درصد رس بالاتر معمولاً مقادیر هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع، نسبت جذب سدیم و درصد سدیم قابل تبادل بالاتری نشان می‌دهند. این پدیده به دلیل ظرفیت تبادل کاتیونی بالاتر، زهکشی ضعیف‌تر و قابلیت نگهداری بیشتر نمک‌ها در خاک‌های ریز یافت است. از نظر توزیع مکانی، نمونه‌های با شوری بالا معمولاً در مناطقی با زهکشی ضعیف یا در نزدیکی منابع آب شور قرار دارند. همچنین، عمق سفره آب زیرزمینی و کیفیت آب آبیاری نیز بر سطح شوری خاک‌ها تأثیر گذار است (Brady and Rengasamy, 2006; Weil, 2016).

خاک‌های شنی-لومی علی‌رغم زهکشی مناسب، در برخی موارد شوری بالایی نشان داده‌اند که احتمالاً به دلیل عوامل خارجی مانند کیفیت آب آبیاری، تبخیر و تعرق بالا، رسوب نمک‌های سطحی ناشی از شرایط اقلیمی خشک، مصرف بیش از حد کودهای شیمیایی یا دامی دارای شوری و همچنین منشأ زمین‌شناسی خاک است. خاک‌های رسی و سیلتی نیز به دلیل زهکشی ضعیف مستعد تجمع شوری هستند.

### سدیم محلول

تحلیل داده‌های کاتیون سدیم محلول در ۲۳ نمونه خاک باغ‌ها انار ساوه نشان می‌دهد که غلظت سدیم از  $۷/۸۴$  تا  $۴۲/۶۳$  میلی‌اکی‌والان در لیتر متغیر است. میانگین غلظت سدیم اندازه‌گیری شده  $۲۰$  با انحراف معیار  $۱۲/۶۵$  میلی‌اکی‌والان در لیتر می‌باشد که نشان‌دهنده پراکندگی قابل توجه داده‌ها است. نتایج مشابه توسط Corwin و Scudiero (۲۰۱۹) گزارش شده است. بررسی چولگی داده‌ها ( $۰/۷۵$ ) حاکی از آن است که توزیع سدیم به سمت مقادیر پایین‌تر از میانگین متمایل است. این بدان معنی است که اگرچه برخی نمونه‌ها دارای غلظت بسیار بالای سدیم هستند، اما بیشتر نمونه‌ها

### سولفات محلول

شاخص‌های آماری مربوط به غلظت یون سولفات محلول در نمونه‌های خاک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقدار سولفات در این نمونه‌ها دارای کمینه‌ای برابر با ۱۷/۱۵ میلی‌اکی‌والان بر لیتر و بیشینه‌ای معادل ۳۸/۸۹ میلی‌اکی‌والان بر لیتر است. میانگین غلظت سولفات برابر با ۱۸/۲۵ میلی‌اکی‌والان بر لیتر به دست آمد. مقدار انحراف معیار که میزان پراکندگی داده‌ها را نسبت به میانگین نشان می‌دهد، برابر با ۱۱/۵۴ است و بیانگر پراکندگی نسبتاً زیاد داده‌هاست. همچنین مقدار چولگی مثبت ۰/۷۵ نشان می‌دهد که توزیع داده‌ها راست‌چوله بوده و داده‌های بزرگ‌تری نسبت به میانگین در انتهای راست نمودار توزیع قرار گرفته‌اند. در کنار این شاخص، کشیدگی نیز برابر با منفی ۱/۰۵ محاسبه شد که نشان‌دهنده پهن‌تر بودن توزیع نسبت به منحنی نرمال است و بیانگر این است که مقادیر اطراف میانگین بیشتر و نوسانات نسبتاً یکنواخت‌تری در کل داده‌ها وجود دارد. غلظت سولفات محلول در این نمونه‌های خاک دارای پراکندگی نسبتاً بالا و توزیعی نامتقارن به سمت راست است. این ویژگی می‌تواند به علت منشأ شوری، نوع مدیریت آبیاری، کیفیت آب مصرفی و نوع کانی‌های موجود در خاک باشد.

تحلیل چارک‌های غلظت سولفات نشان می‌دهد که میان غلظت سولفات در نمونه‌های خاک ۱۲/۰۷ میلی‌اکی‌والان بر لیتر است. ۲۵ درصد نمونه‌ها دارای غلظت سولفات کمتر از ۹/۱۶ و ۲۵ درصد دیگر غلظتی بالاتر از ۲۸/۱۶ میلی‌اکی‌والان بر لیتر دارند که بر اساس استانداردهای فائو، غلظت‌های بالاتر از ۲۰ میلی‌اکی‌والان بر لیتر نیاز به مدیریت ویژه‌ای مانند آبیاری و کاهش مصرف کودهای سولفات هستند. سولفات یکی از آنیون‌های اصلی در خاک‌های شور است. اگرچه سولفات به‌خودی‌خود سمیت کمی برای گیاهان دارد (بر خلاف کلر یا بور)، اما در مقادیر بالا می‌تواند باعث افزایش شوری کل خاک شود. سولفات با کلسیم، منیزیم یا سدیم ترکیب شده و رسوبات کم محلول ایجاد می‌کند و سبب کاهش قدرت یونی محلول خاک می‌شود؛ اما در خاک‌های آهکی و کم زهکش، به‌ویژه همراه با سدیم، باعث کاهش تهویه و آبیاری کمتر املاح و همچنین باعث تلخی یا کاهش کیفیت آب آبیاری شده و اثرات غیرمستقیم روی درخت انار بگذارد (Maas and Hoffman, 1977).

### بی‌کربنات محلول

آنیون بی‌کربنات به‌تنهایی سمیت مستقیم برای گیاه ندارد، اما افزایش آن در خاک یا آب آبیاری به‌ویژه در درختان میوه مانند انار اثرات غیرمستقیم منفی بر تغذیه و کیفیت خاک دارد. تحلیل

کاهش می‌یابد، واضح است که جایگزینی کاتیون‌های کلسیم و منیزیم به‌جای سدیم در سطح کلونیدهای خاک، از پیامدهای منفی سدیمی‌شدن جلوگیری می‌کند؛ بنابراین، وجود مقادیر کافی کلسیم و منیزیم می‌تواند اثرات نامطلوب سدیم بر پایداری ساختار خاک و حاصلخیزی آن را کاهش دهد (Qadir and Oster, 2004).

### کلر محلول

شاخص مخاطرات کلر محلول در خاک برای درختان انار اهمیت زیادی دارد، زیرا کلر محلول یکی از عناصر سمی در غلظت‌های بالا است و در خاک‌های شور یا مناطقی با آبیاری با آب شور می‌تواند باعث زردی برگ، سوختگی نوک برگ‌ها، ریزش برگ و کاهش عملکرد شود. درختان انار در مقایسه با درختان حساس‌تری مثل مرکبات، تحمل نسبتاً متوسطی به کلر دارند، اما همچنان باید میزان کلر محلول در خاک و آب بررسی و مدیریت شود (Maas and Grattan, 1999). تحلیل داده‌های آنیون کلر نشان داد که غلظت کلر از ۸ تا ۴۳/۵ میلی‌اکی‌والان در لیتر متغیر است. میانگین غلظت کلر اندازه‌گیری شده ۲۰/۴۱ میلی‌اکی‌والان در لیتر با انحراف معیار ۱۲/۹۰ می‌باشد که نشان‌دهنده پراکندگی قابل‌توجهی در داده‌ها است. مقدار ۱۰ میلی‌اکی‌والان در لیتر به عنوان حد بحرانی کلر محلول در خاک‌های کشاورزی براساس گزارش FAO (۲۰۱۷) می‌باشد که هدف آن پیشگیری از هرگونه اثر منفی بالقوه بر گیاهان حساس بوده و جنبه محافظه‌کارانه دارد. تحلیل چارک‌ها نشان داد که ۲۵ درصد نمونه‌ها دارای غلظت کلر محلول کم، ۳۵ درصد در دسته متوسط و ۴۰ درصد نمونه‌ها در دسته غلظت بالا تقسیم‌بندی می‌شود.

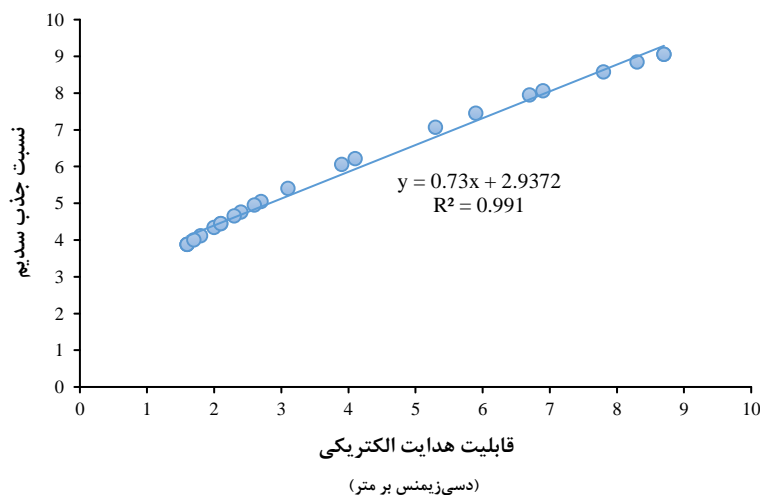
بررسی چولگی داده‌ها (۰/۷۵) نشان می‌دهد که توزیع کلر به سمت مقادیر پایین‌تر متمایل است. این بدان معنی است که اگرچه برخی نمونه‌ها دارای غلظت بسیار بالای کلر هستند، اما بیشتر نمونه‌ها در محدوده کم تا متوسط قرار دارند. دامنه تغییرات کلرید (۳۵/۵ واحد) بیانگر تنوع زیاد این آنیون در خاک باغ‌ها انارکاری است. حدود ۷۵ درصد از باغ‌های مورد مطالعه با تهدید اثرات سوء ناشی از غلظت بالای کلر محلول مواجه هستند. اقدامات اصلاحی نظیر شستشوی خاک با آب آبیاری با کیفیت مناسب، مدیریت آبیاری برای جلوگیری از تجمع بیشتر کلر، استفاده از گیاهان پوششی متحمل به شوری و کاربرد کودهای حاوی کلسیم برای تعدیل اثرات منفی کلر توصیه می‌شود (Minhas Grattan and Grieve, 1999; et al., 2020).

ترکیب یونی خاک‌های مورد مطالعه به طور میانگین از ۴۹ درصد سدیم، ۵۱ درصد کلسیم و منیزیم در بخش کاتیونی و ۵۲ درصد کلرید، ۴۴ درصد سولفات و ۴ درصد بی‌کربنات در بخش آنیونی تشکیل شده است. الگوی غالب یونی، سیستم کلرور - سدیم با غلبه سدیم در ۵۲ درصد نمونه‌ها و برتری کلرید در ۷۸ درصد نمونه‌هاست.

### نسبت جذب سدیم

نتایج نشان داد که مقادیر نسبت جذب سدیم از ۳/۸۸ تا ۹/۰۵ متغیر است. میانگین این شاخص ۵/۹۲ با انحراف معیار ۱/۸۹ محاسبه شده که نشان‌دهنده پراکندگی نسبتاً بالایی در داده‌ها می‌باشد. چولگی ۰/۵۵ نشان‌دهنده این است که بیشتر داده‌ها مقادیری کمتر از میانگین دارند. کشیدگی ۱/۳۳- نشان‌دهنده توزیع نسبتاً مسطح داده‌ها است. خاک‌های مورد مطالعه از نظر ویژگی نسبت جذب سدیم در گروه بدون خطر قرار می‌گیرند (FAO, 2021). شکل ۳ تغییرات نسبت جذب سدیم را مقابل هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع در خاک‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

شاخص‌های آماری بی‌کربنات محلول در نمونه‌های خاک نشان می‌دهد که غلظت این آنیون در محدوده ۰/۸۵ تا ۴/۶۱ میلی‌اکی‌والان بر لیتر متغیر است. میانگین غلظت بی‌کربنات ۲/۱۶ میلی‌اکی‌والان بر لیتر محاسبه شد. انحراف معیار ۱/۳۷ میلی‌اکی‌والان بر لیتر بیانگر پراکندگی نسبتاً بالای داده‌ها حول میانگین است. چولگی مثبت (۰/۷۵) تأیید می‌کند که توزیع داده‌ها به سمت مقادیر بالاتر متمایل است. حدود ۷۵ درصد نمونه‌ها دارای غلظت بی‌کربنات کمتر از ۳/۳۴ میلی‌اکی‌والان بر لیتر هستند که نشان‌دهنده تمرکز بیشتر داده‌ها در محدوده غلظت‌های پایین‌تر می‌باشد. بر اساس استانداردهای فائو، غلظت‌های بالای ۲/۵ میلی‌اکی‌والان بر لیتر می‌تواند برای گیاهان مشکل‌ساز باشد که در این مطالعه حدود ۳۰ درصد نمونه‌ها در این محدوده قرار می‌گیرند. این نتایج اهمیت پایش منظم و مدیریت اصولی بی‌کربنات در خاک‌های مورد مطالعه را برجسته می‌سازد. غلظت بی‌کربنات بیشتر از ۲/۵ میلی‌اکی‌والان در لیتر باعث رسوب کلسیم و منیزیم به شکل کربنات یا بی‌کربنات و در نتیجه کاهش جذب این عناصر توسط گیاه می‌شود. همچنین با کاهش کلسیم در محلول خاک، نسبت سدیم جذب شده افزایش یافته و نیز موجب افزایش قلیائیت خاک و کاهش حلالیت عناصر کم‌مصرف شود (Ayers and Westcot, 1985).



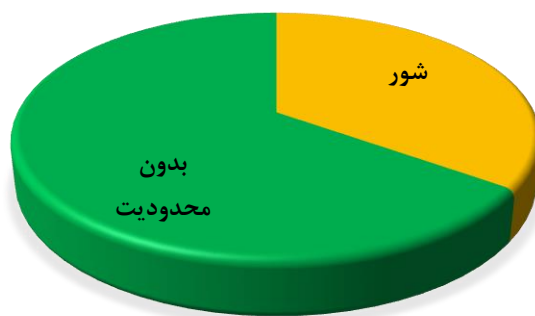
شکل ۳- تغییرات نسبت جذب سدیم در مقابل هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع در خاک‌های انار کاری ساوه  
Figure 3. Variation of sodium adsorption ratio (SAR) versus electrical conductivity of saturated paste extract in soils of saveh pomegranate orchards

رگرسیون حاکی از آن است که به ازای هر واحد افزایش هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع، نسبت جذب سدیم به میزان ۰/۷۳ واحد

شکل ۳ رابطه خطی قوی بین هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع خاک و نسبت جذب سدیم را نشان می‌دهد. معادله

Corwin and ( ساختار) در شوری‌های بالا تشدید می‌شود ( Yemoto, 2020). این تحلیل نشان می‌دهد که مدیریت نسبت جذب سدیم نیازمند برنامه‌ریزی تلفیقی با در نظر گرفتن ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک می‌باشد ( Shrivastava and Minhas et al., 2020; Kumar, 2015).

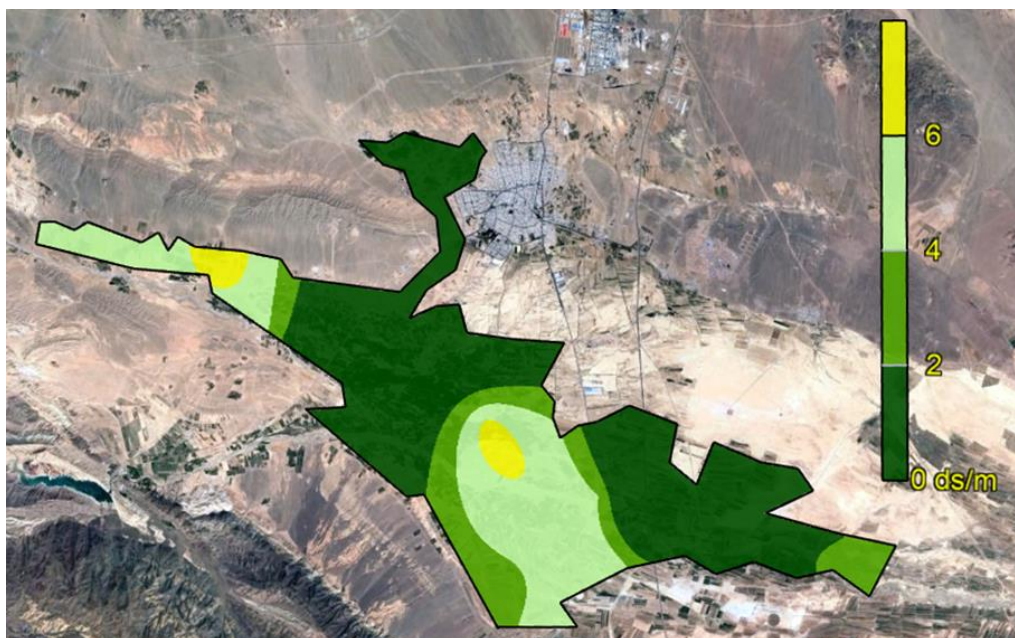
افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده وابستگی مستقیم و خطی این دو پارامتر است. ضریب تعیین ۰/۹۹۱ نیز بیانگر دقت بسیار بالا در پیش‌بینی نسبت جذب سدیم بر اساس هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع در خاک است و نشان می‌دهد داده‌ها به‌طور چشم‌گیری حول خط رگرسیون متمرکز بوده و خطر سدیمی‌شدن خاک (تخریب



شکل ۴- طبقه‌بندی کیفی خاک‌های انار کاری ساوه از نظر شوری  
Figure 4. Qualitative classification of soil salinity in saveh pomegranate orchards

بودند که نشان‌دهنده عدم مخاطره قلیابیت و حفظ پایداری ساختار خاک است. می‌توان در خاک‌های مطالعه شده مشکل اصلی شوری می‌باشد بنابراین، مدیریت این اراضی باید بر اصلاح شوری از طریق شستشو و زهکشی متمرکز شود (FAO, 1985).

همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است ۶۵/۲ درصد از خاک‌های مورد مطالعه از نظر شوری و سدیمی بدون محدودیت و ۳۴/۸ درصد در رده خاک‌های شور طبقه‌بندی شدند. از نظر خطر سدیمی بودن، تمامی نمونه‌ها دارای درصد سدیم تبادلی کمتر از ۱۵



شکل ۵- پهنه بندی هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع خاک‌های انار کاری ساوه

Figure 5. Spatial distribution of electrical conductivity of saturated paste extract in soils of Saveh pomegranate orchards

دارای شوری کمتر از ۴ دسی‌زیمنس بر متر بوده و حدود ۷ هزار هکتار دارای شوری بیش از این حد بحرانی بوده که نیازمند اقدامات مدیریتی و اصلاحی است (Corwin and Lesch, 2005).

### نتیجه‌گیری

یافته‌های تحقیق حاضر نشان داد که شوری خاک یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده در تولید پایدار انار در شهرستان ساوه است. افزایش هدایت الکتریکی و سدیمی‌شدن خاک‌ها اثرات منفی قابل‌توجهی بر رشد، عملکرد و کیفیت میوه انار دارد. بررسی ویژگی‌های شیمیایی نمونه‌های خاک نشان داد که در حدود ۳۵ درصد از خاک‌ها در رده شور قرار گرفتند که می‌تواند محدودیت جدی در رشد و عملکرد انار ایجاد کند. پایش غلظت سدیم و بی‌کربنات می‌تواند به عنوان راهکار مدیریت باغ‌ها برای جلوگیری از خطر تخریب ساختمان و کاهش حاصلخیزی خاک در نظر گرفته شود. از سوی دیگر، نوع و روش آبیاری نقش تعیین‌کننده‌ای در مدیریت شوری و شست‌وشوی نمک‌ها از ناحیه ریشه دارد. استفاده از روش‌های مناسب آبیاری می‌تواند به کاهش تجمع نمک در خاک و حفظ حاصلخیزی کمک کند.

برای مدل‌سازی فضایی شوری خاک، از روش کریجینگ معمولی (Ordinary Kriging) پس از تبدیل لگاریتمی داده‌ها به‌منظور نرمال‌سازی توزیع استفاده شد (Goovaerts, 1997; Webster and Oliver, 2007). مدل واریوگرام بهینه، از نوع کروری (Spherical) با پارامترهای نقطه‌قطع (Nugget) معادل ۱/۵، سقف (Sill) برابر با ۱۸ و برد (Range) حدود ۸ کیلومتر تعیین گردید. نسبت پایین نقطه‌قطع به سقف (۳/۸ درصد) بیانگر همبستگی فضایی قابل توجه در داده‌ها است (Isaaks and Srivastava, 1989). دقت مدل با استفاده از اعتبارسنجی متقاطع و شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر ۲/۱ ارزیابی شد (Li and Heap, 2014).

با این حال، همان‌طور که اشاره شد، شوری خاک در مقیاس محلی تغییرپذیری بالایی دارد و عمدتاً تابعی از کیفیت آب آبیاری و مدیریت مزرعه است؛ بنابراین، نقشه حاصل بیشتر روند کلی فضایی شوری را نشان می‌دهد و ممکن است در برخی نقاط مقادیر واقعی متفاوت باشد، به‌ویژه در مناطقی که پوشش باغ انار کامل نیست یا شرایط محلی متفاوت است. بر این اساس از مجموع حدود ۲۵ هزار هکتار اراضی انارکاری ساوه، نزدیک به ۱۸ هزار هکتار

## References

1. Ministry of Agriculture Jihad of Iran. 2022. Agricultural Statistical Yearbook 1400 (2021/22). Tehran: Deputy for Planning and Economic Affairs.(in persian)
2. Alloway, B. J. 2008. Micronutrient deficiencies in global crop production. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6860-7>.
3. Ayers, R. S., and Westcot, D. W. 1985. Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 29.
4. Brady, N. C., and R. R. Weil. 2016. The nature and properties of soils (15th ed.). Pearson. (Chapter 9: Soil Acidity).
5. Chen, Y., and P. Barak. 1982. Iron nutrition of plants in calcareous soils. *Advances in Agronomy*, 35, 217-240. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60326-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60326-0).
6. Corwin, D. L. 2021. Climate change impacts on soil salinity in agricultural areas. *European Journal of Soil Science*, 72(2), 842-862. <https://doi.org/10.1111/ejss.13010>. 862.
7. Corwin, D.L., and K. Yemoto. 2020. "Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids." In *Methods of Soil Analysis* (pp. 1-18). SSSA Book Series.
8. Corwin, D. L., and E. Scudiero. 2019. Review of soil salinity assessment for agriculture across multiple scales using proximal and/or remote sensors. *Advances in Agronomy*, 158, 1-130. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.07.001>.
9. Corwin, D. L., and Lesch, S. M. 2005. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46, 11-43. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2004.10.005>.
10. Fageria, N. K., V.C. Baligar., and C.A. 2011. Growth and mineral nutrition of field crops (3rd ed.). CRC Press. <http://dx.doi.org/10.1017/S0014479711000263>.
11. Food and Agriculture Organization. 2021. Handbook for Saline Soil Management. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
12. Food and Agriculture Organization. 2017. Water quality for agriculture (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29 Rev. 1).
13. Food and Agriculture Organization. 2016. Calcium and magnesium in irrigation water: Significance in soil and plant systems (FAO Water Reports 42). FAO.
14. Food and Agriculture Organization . 1985. Water quality for agriculture (Irrigation and Drainage Paper No. 29). Rome: FAO.
15. Goovaerts, P. 1997. Geostatistics for natural resources evaluation. New York: Oxford University Press.
16. Grattan, S.R., and C.M. Grieve. 1999. Salinity-mineral nutrient relations in horticultural crops. *Scientia Horticulturae*, 78(1-4), 127-157.
17. Havlin, J. L., J.D. Beaton., S.L. Tisdale., and W.L. Nelson. 2014. Soil fertility and fertilizers (8th ed.). Pearson.
18. Holland, D., K. Hatib., and I. Bar-Ya'akov. 2009. Pomegranate: botany, horticulture, breeding. *Horticultural Reviews*, 35, 127-191. <https://doi.org/10.1002/9780470593776.ch2>.
19. IPCC. 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
20. Isaaks, E. H., and Srivastava, R. M. 1989. An introduction to applied geostatistics. New York: Oxford University Press.
21. Karimi, H. R., and S.H. Mirdehghan. 2013. Correlation between the morphological characters of pomegranate (*Punica granatum*) traits and their implications for breeding. *Turkish Journal of Botany*. 355-362.
22. Oster, J. D., and I. Shainberg. 1979. Exchangeable cation hydrolysis and soil weathering as affected by exchangeable sodium. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43:70-75.
23. Li, J., and A. D. Heap. 2014. Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review. *Environmental Modelling & Software*, 53, 173-189. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.008>.
24. Lindsay, W. L., and A.P. Schwab. 1982. The chemistry of iron in soils and its availability to plants. *Journal of Plant Nutrition*, 5(4-7), 821-840.

- <https://doi.org/10.1080/01904168209363012>.
25. Loeppert, R. H., and D.L. Suarez. 1996. Carbonate and gypsum. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis, Part 3: Chemical methods* (pp. 437-474). SSSA.
  26. Maas, E. V. 1993. Salt tolerance of plants. *Appl. Agric. Res.*, 1, 12–36.
  27. Maas, E. V., and G.J. Hoffman. 1977. Crop salt tolerance-current assessment. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 103(2), 115-134.
  28. Marschner, P. 2012. *Mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). Academic Press. (Chapter 15: Soil ph).
  29. Maas, E.V. and S.R. Grattan. 1999. *Crop yields as affected by salinity*. In: R.W. Skaggs & J. Van Schilfgaarde (Eds.), *Agricultural Drainage. Agronomy Monograph No. 38*. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.
  30. Mastrogiannidou, E., C. Chatzissavvidis, C. Antonopoulou, V. Tsabardoukas, A. Giannakoula, and I. Therios. 2016. Response of pomegranate cv. Wonderful plants to salinity. *Journal of soil science and plant nutrition*, 16(3), 621-636. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162016005000032>.
  31. Mclean, E. O. 1982. Soil ph and lime requirement. In A. L. Page (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 2 Chemical and microbiological properties* (pp. 199-224). ASA-SSSA.
  32. Minhas, P. S., T.B. Ramos, A. Ben-Gal, and L.S. Pereira. 2020. Coping with salinity in irrigated agriculture: Crop evapotranspiration and water management issues. *Agricultural Water Management*, 227, 105832. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105832>.
  33. Mirdehghan, S. H., and M. Rahemi. 2015. Effects of hot water treatment on reducing chilling injury of pomegranate (*Punica granatum*) fruit during storage. V International Postharvest Symposium, 887-892.
  34. Momenpour, A. , M. Dehestani Ardakani, M. Shirmardi, J. Gholamnezhad, F. Ahmadi, and Z. Jamaati. 2022. Salinity tolerance evaluation of twelve selected pomegranate (*Punica granatum*) genotypes to achieve tolerant cultivars and rootstocks. *Journal of Horticulture and Postharvest Research*, 5(Issue 4), 363-378. <https://doi.org/10.22077/jhpr.2022.5152.1270>.
  35. Qadir, M., and J. D. Oster. 2004. Crop and irrigation management strategies for saline-sodic soils and waters aimed at environmentally sustainable agriculture. *Science of the Total Environment*, 323(1–3), 1–19, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2003.10.012>.
  36. Rengasamy, P. 2006. World salinization with emphasis on Australia. *Journal of Experimental Botany*, 57(5), 1017-1023. <https://doi.org/10.1093/jxb/erj108>.
  37. Rengasamy, P. 2010. Soil processes affecting crop production in salt-affected soils. *Functional Plant Biology*, 37(7), 613-620. <https://doi.org/10.1071/FP09249>.
  38. Rhoades, J. D. 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis, Part 3: Chemical methods* (pp. 417-435). SSSA.
  39. Richards, L.A. 1954. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. USDA Handbook 60. Washington, DC: United States Department of Agriculture
  40. Rhoades, J.D., and J. Loveday. 1990. Salinity in irrigated agriculture. ASA Monograph 'Irrig. Of Agric. Crops', Agron. Monogr. No. 30. Pp.1089–1141.
  41. Rhoades, J.D., F. Chanduvi, and S. Lesch. 1999. Soil salinity assessment: methods and interpretation of electrical conductivity measurements. FAO irrigation & drainage paper 57. Rome: FAO. ISBN 92-5-104281-0.
  42. Ryan, J., G. Estefan, and A. Rashid. 2001. *Soil and plant analysis laboratory manual* (2nd ed.). ICARDA.
  43. Shrivastava, P., and R. Kumar. 2015. Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 22(2), 123-131. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2014.12.001>.
  44. Soil Science Society of America. 1996. *Methods of Soil Analysis: Part 3—Chemical Methods*. (D.L. Sparks, Ed.). Madison, WI: SSSA Book Series No. 5.
  45. Sparks, D. L., A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Loeppert, P.N. Soltanpour, M.A.

- Tabatabai, and M.E. Sumner. 2020. Methods of soil analysis, Part 3: Chemical methods (SSSA Book Series No. 5). Soil Science Society of America.
46. Sposito, G. 2008. The chemistry of soils (2nd ed.). Oxford University Press.
47. Taghizadeh-Mehrjardi, R., B. Minasny, F. Sarmadian, B.P. Malone. 2014. Digital mapping of soil salinity in Ardakan region, central Iran. *Geoderma*. 213:15-28. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.07.020>.
48. Thomas, G. W. 1996. Soil ph and soil acidity. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis, Part 3: Chemical methods* (pp. 475-490). SSSA.
49. UNECE. 2022. New UNECE standard will boost international trade in pomegranate. [online available] <https://unece.org/sustainable-development/press/new-unece-standard-will-boost-international-trade-pomegranate>.
50. Webster, R., and Oliver, M. A. 2007. *Geostatistics for environmental scientists* (2nd ed.). Chichester: John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470517277>.
51. Zaouay, F., P. Mena, and C. Garcia-Viguera, and M. Mars. 2012. Antioxidant activity and physico-chemical properties of Tunisian grown pomegranate (*Punica granatum L.*) Cultivars. *Industrial Crops and Products*, 40, pp.81-89. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.02.045>.



## Dynamics and Distribution of Different Forms of Phosphorus and Potassium in the Rhizosphere of Maize and Potato under Drip Fertigation

Meisam Rezaei<sup>a\*</sup>, Mostafa Marzi<sup>a</sup>, Kambiz Bazargan<sup>a</sup>, Karim Shahbazi<sup>a</sup>, and Meysam Cheraghi<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran.

### Article Info

#### Article Type

Research Article

#### Received

August 24, 2025

#### Revised

October 05, 2025

#### Accepted

October 26, 2025

#### Published online

December 20, 2025

#### Keywords

Drip irrigation,  
Fertigation,  
Model,  
Simulation,  
Soil moisture,  
Solute transport and  
movement.

#### \*Corresponding author's email

[Meisam.rezaei1@gmail.com](mailto:Meisam.rezaei1@gmail.com)

### Extended Abstract

**Background and Objectives:** Agricultural systems in arid and semi-arid regions face significant challenges, including water scarcity, climate change, and inefficient resource management. Drip fertigation, which delivers water and fertilizers directly to the root zone, enhances resource use efficiency by synchronizing nutrient supply with crop demand. Understanding the dynamics of essential nutrients like phosphorus (P) and potassium (K) under this system is vital, as their behavior differs significantly. Phosphorus is relatively immobile in soil due to strong adsorption and precipitation reactions, particularly in calcareous soils. In contrast, potassium exhibits greater mobility, moving via both diffusion and mass flow. The distribution of these nutrients is influenced by the soil's wetting pattern, soil properties, irrigation regime, and crop root architecture. This field study investigates the spatiotemporal dynamics of P and K for two crops with contrasting root systems—maize and potato—under drip fertigation. This study aimed to: 1) Evaluate the horizontal and vertical distribution of soluble and available forms of P and K in the soil profile around maize and potato roots; 2) Compare the nutrient depletion profiles in the rhizosphere of both crops; and 3) Investigate the transformation of applied P and K into less mobile forms over time.

**Materials and Methods:** The research was carried out at the Soil and Water Research Institute in Karaj, Iran. The soil texture was clay loam with a calcareous nature (0.6% organic carbon and 9.4% calcium carbonate equivalent). Potato (*Agria* cultivar) was cultivated in a ridge-and-furrow system, while maize (Single Cross 704 hybrid) was planted in a strip pattern. The field was equipped with a surface drip irrigation system. Irrigation was applied twice weekly for 4 hours per session, delivering 4 liters per meter of drip tape. The fertilizer requirement (e.g., NPK), determined based on soil test results, was applied in two split applications. Fertigation commenced one hour after the start of irrigation and continued for three hours. Soil moisture was monitored twice daily using TDR sensors installed at various depths (10–50 cm). Following the first and second fertigation events, intensive soil sampling was performed at specific time intervals (4, 24, 98, 624, and 1632 hours after each). Samples were taken at horizontal distances of 0, 5, 10, and 15 cm from the emitter and at vertical depth intervals of 0–5, 5–10, 10–15, 15–20, 25–30, and 30–40 cm using an auger, with two replicates per treatment (including a non-cropped control plot). The collected soil samples were analyzed for soluble P, available P (Olsen method), soluble K, exchangeable K, and non-exchangeable K.

**Results:** The results revealed distinctly different distribution patterns for potassium and phosphorus. The maximum accumulation for both elements was confined to a zone within 0–15 cm vertically and 0–35 cm horizontally from the drip emitter, closely following the advance of the soil wetting front. Phosphorus movement was limited. Maximum vertical and horizontal movement reached only 13 cm and 20 cm, respectively. Soluble P concentrations increased sharply shortly after

fertigation and returned to baseline within five days. Available P showed greater horizontal dispersion than soluble P. Crop-specific differences were evident; maize restricted vertical P movement, while potato promoted lateral dispersion, reflecting their distinct root architectures and water uptake patterns. Potassium was significantly more mobile, moving up to 20 cm vertically and over 35 cm horizontally. The distributions of soluble and exchangeable K were highly correlated and dependent on moisture flow. Rapid K movement occurred initially when soil moisture was high. Importantly, K concentrations in the root zone of cropped plots were substantially lower than in the non-cropped control, demonstrating significant plant uptake.

**Conclusion:** This study demonstrates that the dynamics and distribution of phosphorus and potassium under drip fertigation are strongly influenced by soil properties, soil moisture, and the specific crop and its root system. The practice of split fertigation with lower concentrations per application is highly recommended, particularly for crops with shallow root systems, as it synchronizes nutrient supply with root activity, thereby improving fertilizer use efficiency and mitigating environmental risks. The successful application of geostatistical interpolation to visualize these complex patterns underscores the potential of integrating simulation models like HYDRUS for optimizing fertigation management strategies, reducing the need for costly and time-intensive field trials. This research provides practical insights for enhancing nutrient management in drip-irrigated maize and potato systems in arid and semi-arid regions.

---

**Cite this article:** Rezaei, M, Marzi, M., Bazargan, K., Shahbazi, K., and Cheraghi, M., 2025. Dynamics and Distribution of Different Forms of Phosphorus and Potassium in the Rhizosphere of Maize and Potato under Drip Fertigation. *Journal of Soil Research*, 39 (3), pp 263-286.



**DOI:** [10.22092/IJSR.2025.370697.787](https://doi.org/10.22092/IJSR.2025.370697.787)

**Publisher:** Soil Science Society of Iran

---



## پویایی و توزیع شکل‌های مختلف فسفر و پتاسیم در خاک اطراف ریشه ذرت و سیب‌زمینی در اثر کودآبیاری با سیستم آبیاری قطره‌ای

میثم رضائی<sup>۱\*</sup>، مصطفی مارزی<sup>۱</sup>، کامبیز بازرگان<sup>۱</sup>، کریم شهبازی<sup>۱</sup> و میثم چراغی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۲</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۳</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۴</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۲۹</p> <p>واژه‌های کلیدی آبیاری قطره‌ای، حرکت و انتقال املاح، رطوبت خاک، شبیه‌سازی، کودآبیاری، مدل‌سازی</p> <p>* ایمیل نویسنده مسئول <a href="mailto:Meisam.rezaei@gmail.com">Meisam.rezaei@gmail.com</a></p>	<p>پویایی، انتقال و توزیع عناصر غذایی در اغلب خاک‌ها غیریکنواخت بوده و این غیریکنواختی در سیستم آبیاری قطره‌ای نمود بیشتری می‌یابد. مطالعه حاضر باهدف بررسی پویایی فسفر و پتاسیم در کشت سیب‌زمینی و ذرت تحت سیستم آبیاری قطره‌ای در مزرعه اجرا گردید. سیب‌زمینی به‌صورت جوی و پشته و ذرت به‌صورت نواری کشت شد. برنامه آبیاری به‌صورت ۲ بار در هفته و هر بار ۴ ساعت معادل ۴ لیتر بر هر متر طول تیپ بود. مقدار کود موردنیاز بر اساس آزمون خاک در دو نوبت تقسیم شد و از طریق کودآبیاری (یک ساعت پس از شروع آبیاری، به مدت سه ساعت) اعمال شد. پس از کودآبیاری اول، نمونه‌برداری خاک در فواصل زمانی ۴، ۲۴، ۹۸، ۲۴۴ و ۱۶۳۲ ساعت و کودآبیاری دوم در فواصل زمانی ۴، ۲۴، ۹۸ و ۹۶۰ ساعت با فواصل افقی ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر و فواصل عمقی ۰-۵، ۵-۱۰، ۱۰-۱۵، ۱۵-۲۰، ۲۰-۲۵، ۲۵-۳۰ و ۳۰-۴۰ سانتی‌متر (روش آگر) از قطره‌چکان با دو تکرار (در ۲ بوته گیاه) انجام شد. رطوبت خاک با استفاده از دستگاه TDR در اعماق ۱۰ تا ۵۰ سانتی‌متر و در دو نوبت روزانه اندازه‌گیری شد. داده‌های حاصل با استفاده از روش‌های درون‌یابی و تحلیل مکانی-زمانی مورد پردازش قرار گرفتند. نتایج حاکی از الگوی کاملاً متمایز توزیع عناصر پرتحرک پتاسیم و کم‌تحرک فسفر بود. به‌طوری‌که بیشترین تجمع این عناصر در محدوده ۰-۱۵ سانتی‌متر عمودی و ۰-۳۵ سانتی‌متر افقی از قطره‌چکان مشاهده شد. همچنین همبستگی معناداری بین الگوی پیشروی جبهه رطوبتی و توزیع عناصر غذایی مشاهده شد. نتایج نشان داد در گیاهان با سیستم ریشه‌زایی سطحی (مانند سیب‌زمینی)، کاربرد تقسیمی کود با دوز کمتر نسبت به کاربرد یکباره کود برتری دارد. بنابراین مدیریت تقسیم کود در سیستم آبیاری قطره‌ای با توجه به الگوی توزیع رطوبت و ویژگی‌های ریشه‌زایی محصول، می‌تواند به‌طور مؤثری کارایی و فراهمی مصرف کود را افزایش داده و از تلفات عناصر غذایی جلوگیری کند.</p>

استناد: رضائی، م.، مارزی، م.، بازرگان، ک.، شهبازی، ک.، چراغی، م.، ۱۴۰۴. پویایی و توزیع شکل‌های مختلف فسفر و پتاسیم در خاک اطراف ریشه ذرت و سیب‌زمینی در اثر کودآبیاری با سیستم آبیاری قطره‌ای. مقاله پژوهشی، نشریه پژوهش‌های خاک، (۳) ۳۹، ص ۲۶۳-۲۸۶.

DOI: 10.22092/IJSR.2025.370697.787



## مقدمه

هستند. بارندگی (زمان و شدت) یا آبیاری، نوع آبیاری، ویژگی‌های خاک، مدیریت شخم، سیستم کشت و کار، نوع و مقدار کود مصرفی، شرایط محیطی، زمان و پوشش گیاهی بر دینامیک مواد غذایی مؤثر است و ممکن است بر جذب پتاسیم و فسفر و حرکت آن‌ها در خاک تأثیرگذار باشند. همچنین، برای دستیابی به عملکرد بالای محصول و بهبود راندمان مصرف عناصر غذایی، کاربرد مناسب و متعادل کودها ضروری است و منجر به بهبود کارایی مصرف کود و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی می‌گردد (Hafeez et al., 2019; Li et al., 2023). مطالعات تعادل عناصر غذایی نشان می‌دهد که نیاز به عرضه پتاسیم و فسفر برای رشد گیاه ضروری است (Sheldrick et al., 2002). به‌طور کلی متوسط پتاسیم افزوده‌شده به خاک از همه منابع (شامل بقایای گیاهی) کمتر از مقداری است که از طریق برداشت محصول از خاک خارج می‌شود (Manning et al., 2017). محدودیت آب آبیاری ممکن است تثبیت و تجمع این نمک‌ها را به دنبال داشته باشد. بنابراین برآورد کمی رفتار، حرکت و تجمع املاح در خاک برای ارزیابی کارایی مصرف کود اهمیت زیادی دارد. از طرف دیگر کاربرد منطقی منابع و جلوگیری از مدیریت نادرست، مستلزم درک عمیق فرآیندهای انتقال آب و املاح در پروفیل خاک‌های تحت آبیاری است (Corwin, 2021; Šimůnek et al., 2024).

عناصر پتاسیم و فسفر (کودهای فسفره و پتاسیمی) که در خاک بکار برده می‌شوند به علت فعل‌وانفعالات شدید با اجزاء خاک (مخصوصاً یون فسفات) معمولاً فواصل خیلی کوتاهی در خاک حرکت می‌کنند و سپس جذب سطوح ذرات فعال خاک مثل رس‌ها و مواد آلی می‌شوند (Rezaei and Movahedi Naeini, 2009b; Rezaei and Movahedi Naeini, 2009a). برهمکنش یون فسفات با کانی‌های کربناتی و گونه‌های کربناتی موجود در محلول خاک از دیگر علل مهم تحرک کم فسفر در پروفیل خاک است (Zhang et al., 2022). نتایج نشان داده است که غلظت فسفر در محل قطره‌چکان‌های سیستم قطره‌ای بیشتر بوده و تدریجاً بافاصله از آن کاهش می‌یابد (Chtouki et al., 2024). Hanson و همکاران (۲۰۰۶) نشان دادند که در تمامی زمان‌های آبیاری صرف‌نظر از نوع آبیاری و کوددهی، پتاسیم و فسفر فقط در محدوده نزدیک خطوط آبیاری تجمع داشتند که به دلیل جذب بالای این دو عنصر بر اجزای خاک و جلوگیری از حرکت آن‌ها در طول پروفیل خاک است (Hanson et al., 2006). حرکت فسفر در خاک عمدتاً از طریق پخشیدگی انجام می‌شود و مقدار فسفر

در سال‌های اخیر سیستم‌های کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک دنیا به‌ویژه ایران با چالش‌های تغییرات اقلیمی، کمبود آب و شیوه نامناسب و ناکارآمد مصرف منابع مواجه است (Li et al., 2023)؛ علاوه بر آن، به دلیل آبیاری سنتی و مدیریت تغذیه نامناسب، امنیت غذایی و پایداری سیستم نیز به مخاطره می‌افتد (Li et al., 2023; Mohamadzade et al., 2022). این موارد به افزایش استفاده از منابع آب برای تولید بیشتر می‌انجامد. بنابراین، بهره‌برداری حداکثری از منابع محدود بارش، آب قابل دسترس، جبران عناصر غذایی خاک، افزایش کارایی مصرف آن‌ها و استفاده از فناوری‌های نوین، از ارکان اساسی در تحقق توسعه پایدار و متوازن عملکرد محصولات کشاورزی در این مناطق به شمار می‌رود (Phogat et al., 2023). آبیاری قطره‌ای توأم با کودآبیاری<sup>۱</sup> که امکان عرضه دقیق آب و مواد مغذی را مستقیماً به منطقه ریشه فراهم می‌کند (مقادیر مناسب، در زمان مناسب و در محل مناسب) به‌عنوان یک راهکار امیدبخش مطرح‌شده است (Kuldeep et al., 2024). ترکیب آبیاری قطره‌ای و کودآبیاری برای تحویل آب و مواد غذایی مستقیماً به ریشه و با هدف هم‌زمان کردن کاربرد کود و نیاز گیاه صورت می‌گیرد. این سیستم همچنین امکان نگهداشتن غلظت و توزیع یون‌ها و آب را در یک سطح دلخواه در خاک فراهم می‌نماید (Chtouki et al., 2024; Gärdenäs et al., 2005; Phogat et al., 2014; Zhang et al., 2015). از آنجا که نهاده‌ها پرهزینه و محدود هستند، این رویکرد تلفات را به حداقل می‌رساند، کارایی استفاده از منابع را بهبود می‌بخشد و دسترسی به مواد مغذی را با نیاز محصول هم‌زمان می‌سازد که از مزایای حیاتی در شرایط خشک و نیمه‌خشک به شمار می‌روند (Gheysari et al., 2021; Guido et al., 2020; Phogat et al., 2023; Surendran and Madhava Chandran, 2022). برنامه کودآبیاری برای افزایش کیفیت و کمیت بسیاری از محصولات در حال گسترش است. در این سیستم‌ها حرکت و دسترسی عناصر غذایی پتاسیم و فسفر به رطوبت خاک، جریان آب در خاک و جبهه رطوبتی و توزیع مجدد آن وابسته است.

نیترژن، پتاسیم و فسفر از عناصر ضروری برای رشد گیاه هستند و در بخش سطحی خاک فراوانند، اما این به معنای دسترس‌پذیری بیشتر برای گیاه نیست (Havlin, 2014; Selim et al., 2018). فاکتورهای زیادی بر دسترسی، تجمع و انتقال مواد غذایی مؤثرند، در عین حال دارای اثرات متقابل پیچیده‌ای نیز

<sup>۱</sup> Fertigation

(شکل‌های تبادلی و غیرتبادلی) با گذشت زمان در اثر کاربرد کود از طریق سیستم آبیاری قطره‌ای اجرا گردید.

### مواد و روش‌ها

این مطالعه در مزرعه تحقیقاتی موسسه تحقیقات خاک و آب (به مختصات جغرافیایی  $28^{\circ}45'35''$  شمالی و  $51^{\circ}57'50''$  غربی)، کرج، ایران انجام شد. قبل از هرگونه عملیات شخم و کشت، نمونه‌برداری از خاک از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر انجام و ویژگی‌های خاک اندازه‌گیری گردید. EC و pH نمونه‌ها در عصاره ۱ شباع (Visconti and de Paz, 2012)، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسید (Page, 1965)، کربن آلی به روش اکسیداسیون تر در حضور دی‌کرومات پتاسیم (Walkley and Black, 1934) بافت به روش هیدرومتری (Bouyoucos, 1962) اندازه‌گیری شد. پتاسیم قابل استفاده به روش استات آمونیم، فسفر قابل استفاده به روش اولسن و ظرفیت تبادل کاتیونی به روش سه مرحله‌ای استات سدیم-استات آمونیم اندازه‌گیری گردید (Shahbazi et al., 2024). بر اساس نتایج تجزیه خاک، خاک دارای بافت لوم رسی، مقدار کربن آلی خاک ۰/۶ درصد و مقدار کربنات کلسیم معادل خاک ۹/۴ درصد بود که تایید کننده ماهیت آهکی بودن خاک است. غلظت پتاسیم و فسفر قابل دسترس خاک نیز به ترتیب ۳۱۰ و ۹/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. همچنین غلظت عناصر میکرو آهن (۲/۱ میلی‌گرم در کیلوگرم)، روی (۱/۴ میلی‌گرم در کیلوگرم)، مس (۱/۳۵ میلی‌گرم در کیلوگرم) و منگنز (۷/۴ میلی‌گرم در کیلوگرم) نیز تعیین شد تا در مرحله کشت بر اساس سطح آزمون خاک، توصیه کودی انجام گیرد.

### سیستم کشت عملیات کاشت، برنامه آبیاری و سیستم کوددهی

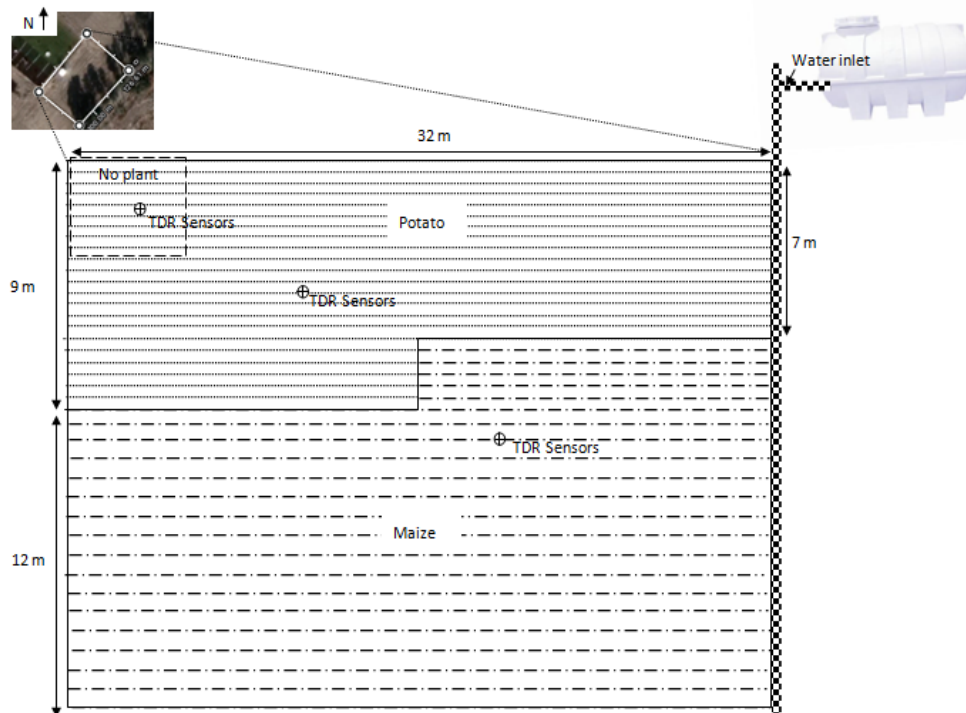
برای اجرای عملیات کشت، آماده‌سازی زمین به صورت خاکورزی سنتی انجام شد که با سیستم قطره‌ای در شرایط آب و هوایی نیمه‌خشک و در یک فصل زراعی بهاره اجرا و مورد مطالعه قرار گرفت. شکل شماتیک تحقیق حاضر در شکل ۱ آمده است. قبل از اجرای عملیات کشت زمین با آبیاری غرقابی خیس گردید و در مرحله گاورو شدن عملیات خاکورزی سنتی مشابه روش معمول کشاورزان انجام شد تا بتوان بهترین نتیجه کاربردی را حصول نمود. کشت سیب‌زمینی (رقم میان رس آگریا) به صورت جوی و پشته به فاصله ردیف‌های ۷۰ سانتی‌متر و فاصله هر گیاه از گیاه دیگر ۶۰ سانتی‌متر در طول پشته بود. کشت ذرت هیبرید (SC704)،

انتقال یافته در خاک بستگی به تراکم خاک، مقدار رطوبت و کلوئیدهای فعال خاک که تعیین‌کننده ظرفیت جذب فسفر است، دارد (Barber, 1995). درحالی‌که پتاسیم در خاک از هم از طریق مکانیسم پخشیدگی و هم طریق مکانیسم جریان انبوه حرکت می‌کند. فرایند پخشیدگی در اثر شیب غلظت پتاسیم بین سطح ریشه و توده خاک اتفاق می‌افتد (Havlin, 2014). با جذب پتاسیم توسط گیاه غلظت آن در نزدیکی سطح ریشه کاهش یافته و در اثر آن شیب غلظتی به وجود می‌آید. پخشیدگی از چندین فاکتور نیز تأثیر می‌پذیرد که شامل دما و مقدار رطوبت است. Phogat و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند که تجمع املاح در اثر کودآبیاری به مدت ۱۵۰ روز ادامه داشته و از آن به بعد به علت بارندگی بالا و آبیاری زیاد نمک‌ها شسته شده و از منطقه ریشه خارج می‌شود. نتایج الگوهای مختلف کودآبیاری (ابتدا، وسط یا انتهای مدت آبیاری) نشان داد که وقتی کاربرد کود در یک یا دو ساعت آخر هر آبیاری صورت می‌گیرد مقدار بیشتری از کود در مقایسه با کاربرد کود در ابتدای آبیاری، جذب گیاه می‌گردد (Phogat et al., 2014). Ajdary و همکاران (۲۰۰۷) در بررسی حرکت عناصر غذایی در مزرعه آزمایشی تحت کشت پیاز و کوددهی به روش کودآبیاری نشان دادند که تأثیر نوع خاک (بافت و رفتار هیدرولیکی) بیشتر از مقادیر آب خروجی از قطره‌چکان‌ها بود. همچنین، در همه استراتژی‌های آبیاری مورد استفاده، املاح به مقدار کافی در منطقه رشد ریشه باقی‌ماند (Ajdary et al., 2007).

باوجود مطالعات محدود در ایران در زمینه انتقال آب و برخی عناصر غذایی در اثر کاربرد با سیستم آبیاری قطره‌ای، تحقیق جامعی در زمینه حرکت و توزیع پتاسیم و فسفر در خاک و جذب آن‌ها توسط گیاهان در سیستم آبیاری قطره‌ای سیب‌زمینی و ذرت گزارش نشده است. گیاهان سیب‌زمینی و ذرت با الگوی متفاوت رشد ریشه و همچنین نیازهای متفاوت به عناصر غذایی فسفر و پتاسیم الگوهای تخلیه متفاوتی در ناحیه ریشه ایجاد می‌کنند. این تفاوت‌ها باعث تحرک متفاوت عنصر غذایی در پروفیل خاک مخصوصاً در محدوده ریشه می‌شود. در این راستا، آگاهی از دینامیک کاربرد این مواد غذایی به صورت کودآبیاری در طراحی سیستم‌ها و برنامه‌ریزی کودآبیاری و توصیه کودی بسیار مفید خواهد بود؛ بنابراین، تحقیق حاضر با اهداف (۱) ارزیابی توزیع عمقی و افقی شکل محلول عناصر پتاسیم و فسفر در پروفیل خاک در مجاورت ریشه‌های سیب‌زمینی و ذرت، (۲) مقایسه پروفیل تخلیه عنصر غذایی در مجاورت ریشه‌های سیب‌زمینی و ذرت و (۳) بررسی میزان تبدیل فسفر و پتاسیم به شکل‌های کمتر متحرک

لازم برای گیاه در دو تقسیط بر اساس توصیه کودی دستورالعمل تلفیقی حاصلخیزی و تغذیه گیاه موسسه خاک و آب از کل مقدار توصیه‌ای ۱۵۰ کیلوگرم کود سوپرفسفات تریپل، ۲۵۰ کیلوگرم سولفات پتاسیم و ۴۵۰ کیلوگرم اوره به‌منظور دستیابی به بیشترین عملکرد به‌صورت کودآبیاری یک ساعت پس از آبیاری اعمال شد (Khavazi et al., 2014; Tehrani et al., 2015) (شکل ۲).

سینگل کراس (۷۰۴) به‌صورت نواری به فاصله ردیف‌های ۶۰ سانتی-متر و فاصله هر گیاه از گیاه دیگر به‌طور میانگین ۱۵ سانتی‌متر در طول ردیف بود. به دلیل وسعت کم کشت و نیاز به دقت بالا، کشت سیب‌زمینی و ذرت به‌صورت دستی انجام گردید. برنامه آبیاری به‌صورت دوبار در هفته و هر بار معادل ۴ ساعت به مقدار ۴ لیتر بر هر متر طول تیپ (لوله) آبیاری اجرا شد. مقدار کود



شکل ۱- موقعیت مکانی و نمای طرح شماتیک پروژه کشت سیب‌زمینی و ذرت تحت آبیاری قطره‌ای

Figure 1. The geographical location and schematic view of the potato and maize cultivation project under drip irrigation.



شکل ۲- نحوه کودآبیاری یک ساعت پس از آبیاری (نوبت اول) برای ذرت، سیب‌زمینی و تیمار شاهد (محل بدون کشت)  
 Figure 2. Fertigation system one hour after the irrigation (first event) for maize, potatoes, and the control treatment (uncultivated area).

کودآبیاری نمونه‌برداری خاک در فواصل زمانی ۴، ۲۴، ۹۸ و ۶۲۴ و ۱۶۳۲ ساعت پس از کودآبیاری و در دور دوم در فواصل زمانی ۴، ۲۴، ۹۸ و ۹۶۰ ساعت انجام شد. نمونه‌برداری خاک در فواصل افقی ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر و فواصل عمقی/عمودی ۰-۵، ۵-۱۰، ۱۰-۱۵، ۱۵-۲۰، ۲۰-۲۵، ۳۰-۳۰ و ۳۰-۴۰ سانتی‌متر (روش آگر) از قطره‌چکان با دو تکرار (دو بوته گیاه) انجام شد. این نمونه‌برداری‌ها از نزدیک‌ترین گیاه به حسگر (برای نقطه بدون گیاه موارد ذکرشده اعمال گردید) برداشته شد تا پراکندگی/تغییرپذیری مکانی به حداقل برسد. در حقیقت فرض گردید که تغییرپذیری مکانی تا یک متر وجود ندارد. نحوه نمونه‌برداری در شکل ۴ قابل مشاهده است. نمونه‌های خاک فوراً به آزمایشگاه منتقل و در یخچال نگهداری شد تا در اسرع وقت غلظت فسفر و پتاسیم و همچنین رطوبت در نمونه‌های برداشت‌شده به روش وزنی اندازه‌گیری شد. همچنین برای اندازه‌گیری غلظت فسفر و پتاسیم محلول عصاره‌های ۱:۱۰ تهیه شد و در عصاره تهیه‌شده غلظت فسفر و پتاسیم اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری مقادیر قابل استفاده خاک مرطوب توزین و با روش معمول عمل استخراج عصاره انجام و اندازه‌گیری در عصاره مربوطه انجام شد. از محتوای رطوبت اندازه‌گیری شده برای تبدیل وزن مرطوب

### اندازه‌گیری و نمونه‌برداری

برای اندازه‌گیری رطوبت، در مکان مورد نظر در هر کشت (شکل ۱) جهت نمونه‌برداری و انجام آزمایشات، حسگر رطوبت‌سنج (تی دی آر<sup>۲</sup>) نصب شد تا میزان رطوبت و حرکت آب در خاک رصد شود. در طول دوره رشد، رطوبت خاک در اعماق مختلف ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متری از سطح خاک و در فاصله افقی حدود ۸-۱۰ سانتی‌متری از نازل قطره‌چکان در دو نوبت در روز اندازه‌گیری شد. شاخص‌ها و پارامترهای گیاهی مانند عملکرد، اجزای عملکرد، عمق ریشه، ارتفاع گیاه و سطح برگ در طول رشد گیاه به صورت هفتگی اندازه‌گیری شده و همچنین میزان دقیق آبیاری ثبت گردید. اینگونه داده‌های مشاهده‌ای کمک شایانی به بررسی توزیع و پیش‌بینی حرکت املاح می‌کنند. برای بررسی میزان غلظت عناصر در زمان کشت و توصیه کودی، ابتدا توزیع غلظت عناصر مورد نظر در خاک از عمق ۰-۴۰ سانتی‌متر با تهیه ۴ نمونه با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر قبل از کشت مشخص شد. مقدار کود لازم برای گیاه در دو تقسیم بر اساس توصیه کودی دستورالعمل تلفیقی حاصلخیزی و تغذیه گیاه موسسه خاک و آب و نتایج تجزیه خاک اعمال شد (شکل ۲). پس از دور اول

<sup>2</sup>Time-Domain Reflectometer, TDR

خاک به وزن خشک استفاده شد. همچنین برای اندازه‌گیری پتاسیم غیرتبادلی از روش عصاره‌گیری با اسید نیتریک جوشان استفاده شد (Shahbazi et al., 2024).



شکل ۳- مکان و نحوه نمونه‌برداری خاک در کشت ذرت و مناطق شاهد (بدون گیاه)  
Figure 3. Soil sampling location in maize cultivation and control (uncultivated) areas.

### ارزیابی حرکت و وضعیت فسفر و پتاسیم خاک استفاده از ابزارهای زمین آمار

برای تجزیه و تحلیل داده‌های مشاهداتی و کمی‌سازی توزیع مکانی-زمانی فسفر و پتاسیم در پروفیل خاک، از رویکردهای زمین‌آمار و مدل‌سازی استفاده شد. داده‌های غلظت عناصر (شامل فسفر محلول، فسفر قابل‌استفاده، پتاسیم محلول، تبادل و غیرتبادلی) که در نقاط و زمان‌های مختلف نمونه‌برداری شده بودند، در محیط نرم‌افزار OriginLab وارد و برای تجسم اولیه و تحلیل‌های پایه (مانند رسم نمودارهای کانتوری و سطوح پاسخ) مورد استفاده قرار گرفتند. برای درون‌یابی داده‌ها و ایجاد سطوح پیوسته از توزیع غلظت در فضای دو بعدی (عمق و فاصله افقی از قطره‌چکان) از روش درون‌یابی کریجینگ<sup>۳</sup> استفاده شد. این روش به دلیل توانایی در نظریه ساختار مکانی داده‌ها و ارائه برآوردهای بهینه، انتخاب گردید. واریوگرام تجربی برای هر مجموعه داده محاسبه و بهترین مدل نظری (مانند مدل گوسی یا نمایی) بر اساس کمترین خطای برآورد به آن برازش داده شد. خروجی این فرآیند، نقشه‌های هم‌غلظت<sup>۴</sup> برای هر عنصر در زمان‌های مختلف پس از کودآبیاری بود که الگوی حرکت و تجمع عناصر را به وضوح نشان می‌دهد.

### نتایج و بحث

#### ویژگی خاک، آب و محلول کودی

جدول ۱ ترکیب شیمیایی آب مورد استفاده برای آبیاری و غلظت املاح مراحل کودآبیاری را نشان می‌دهد. آب آبیاری بدون کود دارای pH ۸/۵ و هدایت الکتریکی ۰/۳۴ دسی‌زیمنس بر متر بود. با افزودن املاح کودی pH کاهش و هدایت الکتریکی افزایش یافت که دور از انتظار نبود. غلظت فسفر، پتاسیم، آمونیوم و نیترات در دو محلول اندکی متفاوت بود هرچند مقدار مواد شیمیایی یکسانی استفاده شده بود. بیشترین تفاوت در مقدار بی‌کربنات و کربنات، منیزیم و پتاسیم دو محلول کودی بود.

<sup>۴</sup> Contour maps

<sup>۳</sup> Kriging

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آب مورد استفاده در آبیاری و غلظت املاح مراحل کودآبیاری

Table 1. Chemical composition of the water used for irrigation and the solute concentrations during the fertigation stages.

CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	P	EC	pH		
mg/L											%	dS/m	
0.2	103.7	7.2	35.5	13.75	0.8	46	6.44	3.92	0	0.34	8.5	آب آبیاری Irrigation Water	
0	256	3	18	18	514	3	504.6	516	0.04	1	7.8	کودآبیاری مرحله اول First-Stage fertigation	
0	628	9	25	19	423	5	479.3	500	0.03	1	7.8	کودآبیاری مرحله دوم Second-stage fertigation	

افزایش یافت (جدول ۲). لایه ۳۵-۶۵ سانتی‌متری خاک دارای بافت سنگین تر و سیلت و رس بیشتری نسبت به لایه‌های بالایی و زیرین بود. البته باید متذکر شد که تغییرات مقادیر شن با افزایش عمق ابتدا کاهشی و سپس افزایشی می‌شود. ظرفیت تبادل کاتیونی لایه‌ها تقریباً یکسان بود.

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی لایه‌های خاک در جدول ۲ خلاصه شده است. نتایج نشان داد که با افزایش عمق مقادیر هدایت الکتریکی و ظرفیت تبادل کاتیونی افزایش یافت در حالی که غلظت یون‌های محلول و تبادل‌پذیری نوسان بوده و اغلب در لایه اول بیشتر از لایه دوم بود و از عمق ۱۵ تا ۱۰۰ سانتی‌متری

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی لایه‌های خاک

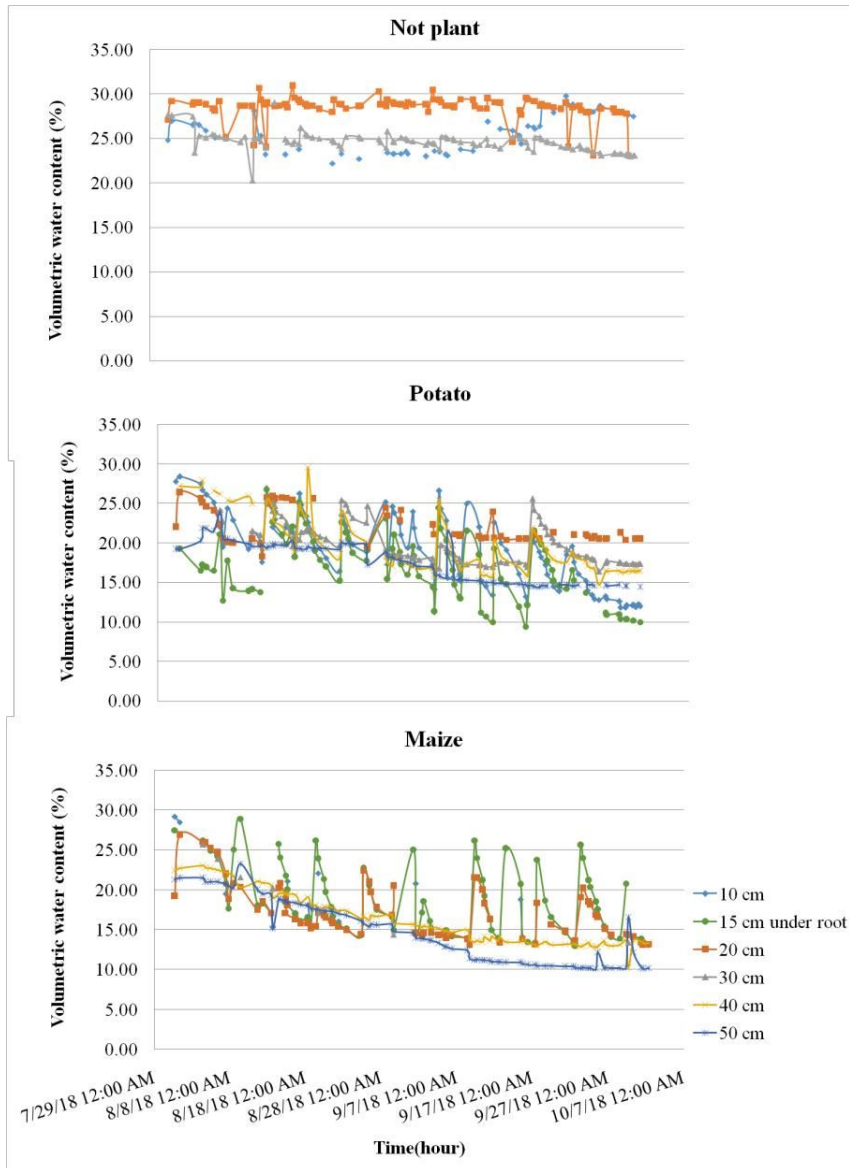
Table 2. Physical and chemical characteristics of the soil layers.

CEC (meq/100gr)	یون‌های محلول Dissolved ions (mg/L)					P <sub>ava</sub> mg/kg	K <sub>ava</sub> mg/kg	pH	EC (dS/m)	رس Clay (%)	سیلت Silt (%)	شن Sand (%)	عمق Depth (cm)
	P	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>								
29.48	0.7	23.5	16	135	51.6	10.2	270	7.9	1.51	28	30	42	0-15
29.75	1.1	18	19	88	25.2	9.6	270	7.9	1.55	24	32	44	15-35
30.81	0.8	24	22	96	46.7	8.4	252	7.9	2.66	30	40	30	35-65
29.75	2.4	23	15	98	58.4	5	191	7.8	2.58	12	38	50	65-100

بیشتر بودن نسبت به کشت سیب‌زمینی و ذرت در این منطقه شده است. علاوه بر آن، نتایج نشان داد که میزان رطوبت خاک در کشت سیب‌زمینی غالباً ۵-۱۰ درصد بیشتر از ذرت بود که دلیل آن را می‌توان به تراکم گیاه و نیاز آبی بیشتر ذرت (تعرق بیشتر) مرتبط دانست (Allen et al., 1998). نکته قابل توجه آن است که از نیمه فصل رشد تا پایان به دلیل رشد ریشه و جذب آب مقادیر آب اضافه شده از طریق آبیاری به عمق ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متری نفوذ نکرده و یا اینکه با توجه به معماری ریشه و توزیع آن به‌ویژه در ذرت، رطوبت این اعماق نیز جذب شده است. علت را نیز می‌توان به توزیع مجدد و جریان رو به بالای آب مرتبط دانست (Rezaei, 2016). همچنین، تغییرات زمانی-دماهی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در شرایط مزرعه، علاوه بر میزان آب می‌تواند عاملی در کاهش رطوبت لایه‌های زیرین باشد (Rezaei, 2016; Rezaei et al., 2016).

### تغییرات روزانه رطوبت خاک

نتایج داده‌های رطوبت روزانه خاک در طول فصل کشت در شکل ۵ آمده است. نتایج نشان داد که حسگرها بیشترین رطوبت را در عمق ۱۵-۲۰ سانتی‌متری برای هر سه محل نصب ثبت کرده‌اند. در برخی عمق‌ها (به‌طور مثال ۱۰ و ۳۰ سانتی‌متری در کشت ذرت) حسگرها به‌خوبی داده‌ای را ثبت نکردند (عدم عملکرد سنجش). نوسانات مقدار آب خاک با حضور گیاه شدیدتر از بدون کشت بود که این نشان‌دهنده تقاضای گیاه برای جذب، تعرق و به‌طور کل جریان حرکت آب است. در قسمت بدون گیاه، مقدار رطوبت در عمق‌های ۱۰-۳۰ سانتی‌متری خاک بین ۲ تا ۳۲ درصد حجمی در طول فصل متغیر بود و بیشترین مقادیر برای عمق ۲۰ سانتی‌متری ثبت شد. به نظر می‌رسد عدم پوشش گیاهی، خشک شدن یکنواخت سطح خاک، کم بودن تقاضا برای تبخیر و تعرق و نیز به مقادیر آبیاری، سبب یکنواخت بودن رطوبت عمق خاک و



شکل ۵- رطوبت حجمی خاک در عمق‌های مختلف برای ناحیه بدون گیاه، سیب‌زمینی و ذرت. حسگرهای تی دی آر در عمق ۱۵ سانتی‌متری با فاصله افقی ۵ سانتی‌متری از بقیه حس‌گرها جایگذاری شد.

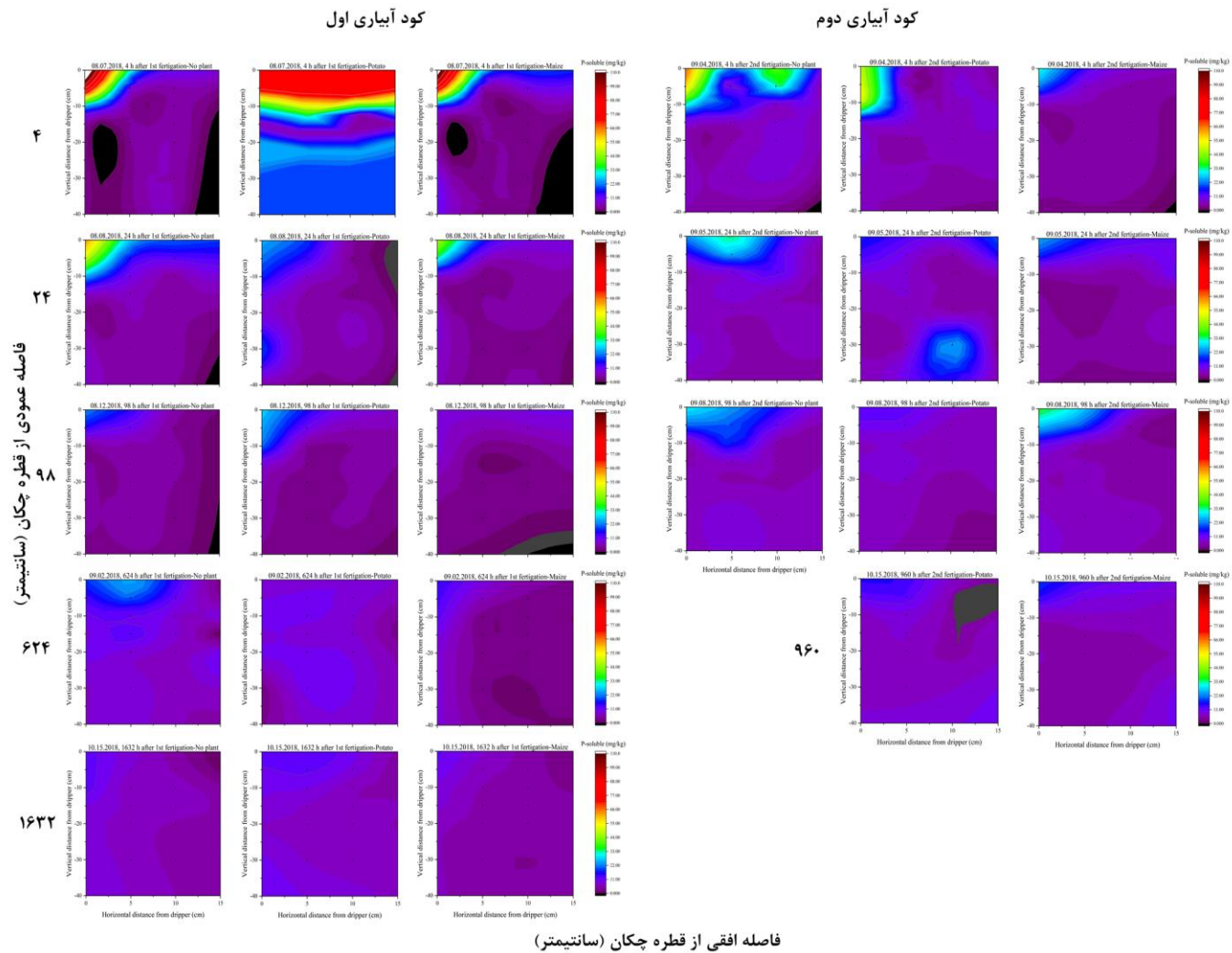
Figure 5. Volumetric soil water content at different depths for the uncultivated area, potato, and maize. The TDR sensors were placed at a depth of 15 cm with a horizontal distance of 5 cm from the other sensors.

همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد بعد از کوددهی غلظت فسفر (محلول و قابل‌دسترس) بالا رفته و پس از گذشت نهایتاً پنج روز به شرایط قبل از کوددهی بازمی‌گردد. می‌توان گفت در این دوره مقدار فراوان فسفر در دسترس گیاه قرار می‌گیرد و گیاه به‌راحتی از آن بهره خواهد برد. هرچند در این دوره چند روزه تغییرات تدریجی به‌واسطه دوره‌های آبیاری نشان داده شد اما کاهش غلظت فسفر به‌واسطه احتمالاً تثبیت شدن در خاک اتفاق افتاده است.

## فسفر محلول و قابل‌دسترس در ناحیه بدون گیاه، کشت سیب‌زمینی و ذرت

در شکل ۶ روند تغییرات زمانی و مکانی فسفر محلول در فاصله افقی و عمودی از قطره‌چکان بعد از کودآبیاری برای ناحیه بدون گیاه، سیب‌زمینی و ذرت نمایش داده شده است. به‌طورکلی با شروع کودآبیاری و پس از گذشت ۴ ساعت غلظت فسفر محلول به‌صورت افقی (۵ سانتی‌متر) و عمودی (۱۰ سانتی‌متر) در خاک افزایش یافت که تابع حرکت و جریان آب در خاک بود. همان‌طور که در شکل نیز مشخص است مقادیر حرکت افقی و عمودی در ۴ ساعت اولیه در ناحیه بدون کشت یا شاهد اندکی بیش از سیب‌زمینی و ذرت است. در ناحیه‌های بدون کشت و سیب‌زمینی باگذشت زمان و پس از ۲۴ ساعت غلظت فسفر محلول خاک در فواصل ۷-۸ سانتی‌متری افقی و ۱۳-۱۵ سانتی‌متری عمودی از قطره‌چکان بیشتر می‌شود (حدود ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم)؛ اما در ناحیه کشت ذرت تغییرات عمودی (حرکت عمودی) کاهش یافت، در حالی که تغییرات افقی تقریباً مشابه سایر نواحی بود. این موضوع می‌تواند به تفاوت در سیستم ریشه‌ای و الگوی جذب آب توسط گیاه مربوط باشد. درنهایت، باگذشت ۹۸ ساعت از کوددهی اول و انجام آبیاری مجدد غلظت فسفر محلول به‌تدریج به حالت تعادل رسید.

تغییرات فسفر محلول خاک در کوددهی دوم متفاوت از کوددهی اول مشاهده شد. در کشت سیب‌زمینی در فاصله عمودی (حرکت عمودی) غلظت بیشتر (تا ۷ سانتی‌متر) و در ذرت حرکت افقی بیشتر (۱۵ سانتی‌متر) ثبت شد که ممکن است به دلیل ماهیت سیستم کشت جوی و پشته و توزیع ریشه‌ها و همچنین تغییرات مکانی باشد. تغییرات افقی بیشتر (تا ۱۵ سانتی‌متری از قطره‌چکان) در ناحیه بدون کشت نسبت به مناطق کشت‌شده مشاهده شد که می‌تواند به دلیل حرکت افقی محلول کودی و آب در بدو ورود به سیستم و توزیع مجدد پس از آن باشد. به‌طورکلی پس از کوددهی دوم تغییرات افقی بیشتر (در فواصل بیشتر نسبت به قطره‌چکان) نسبت به دور اول مشاهده شد.



فاصله افقی از قطره چکان (سانتیمتر)

شکل ۶- غلظت فسفر محلول در زمان‌های مختلف بعد از کوددهی (۴، ۲۴، ۹۸، ۶۲۴ و ۱۶۳۲ ساعت (کودآبیاری اول) و ۴، ۲۴، ۹۸ و ۹۶۰ ساعت (کودآبیاری دوم)) برای ناحیه بدون گیاه، سیب‌زمینی و ذرت. نقاط سیاه مشخص شده در شکل‌ها نشان‌دهنده نقاط نمونه‌برداری است.

Figure 6. Soluble phosphorus concentration at different times after fertilization (4, 24, 98, 624, and 1632 hours (after first fertilization) and 4, 24, 98, and 960 hours (after second fertilization)) for the uncultivated area, potato, and maize. The black points marked in the figures indicate the sampling points.

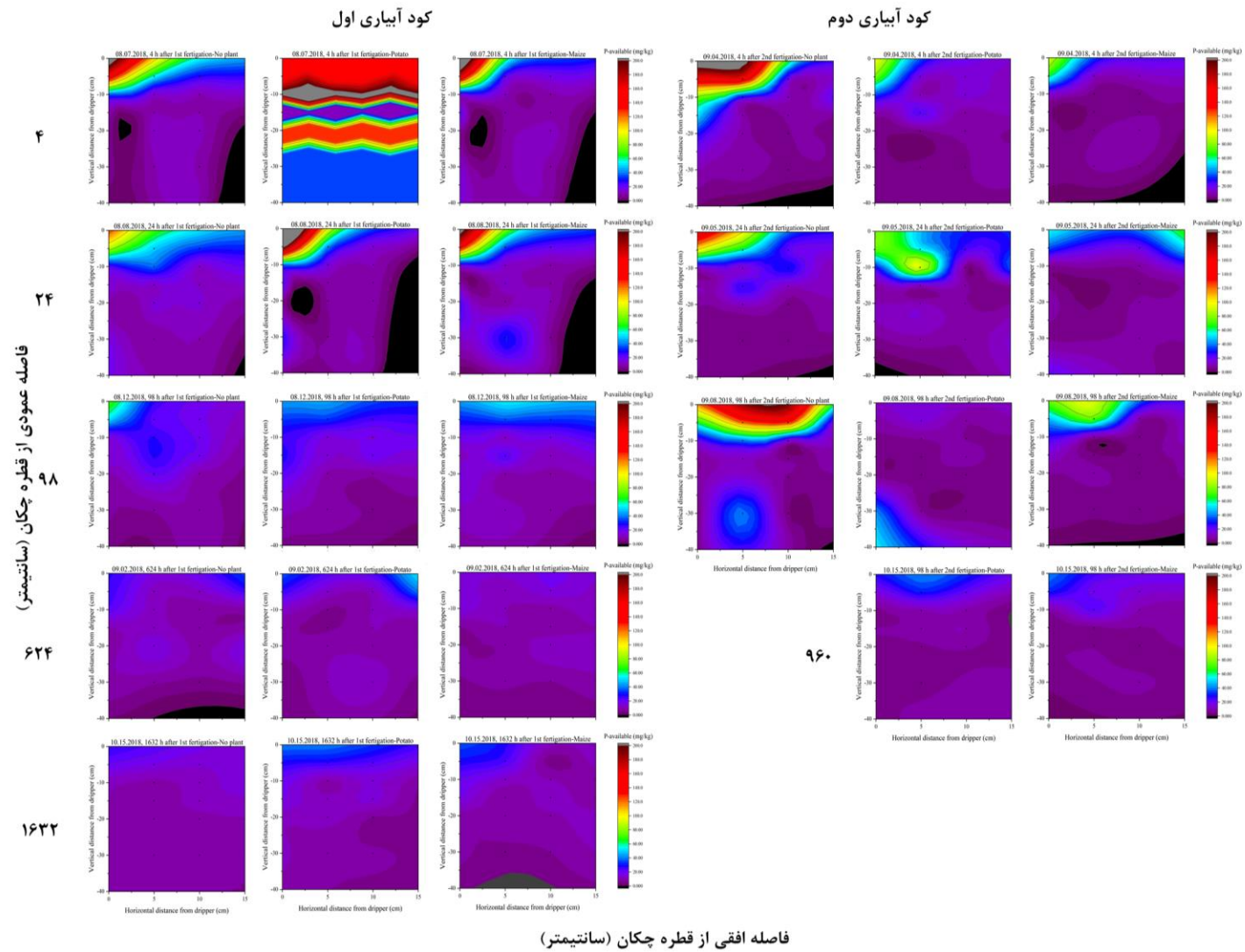
قطره‌چکان‌های سیستم قطره‌ای بیشتر بوده و تدریجاً بافاصله از آن کاهش می‌یابد (Hanson et al., 2006). از آنجایی که در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای بخش خاصی که تحت آبیاری قطره‌ای است خیس می‌شود بنابراین ریشه گیاه در منطقه محدودی (منطقه خیس) گسترش می‌یابد و در نتیجه تغییرات غلظت در آن نواحی شدیدتر است (Coelho and Or, 1999; Rajj et al., 2016; Singh et al., 2006).

به‌طور کلی می‌توان گفت که حرکت عمودی فسفر حداکثر به ۱۳ سانتی‌متر زیر قطره‌چکان (محل تزریق کود) و حرکت افقی حدود ۲۰ سانتی‌متر است (تغییر معنادار نسبت به شرایط اولیه غلظت). دلیل این تفاوت را می‌توان این‌گونه تفسیر کرد که در سیستم آبیاری قطره‌ای تیپ حرکت جانبی آب بیش از حرکت عمودی آن است (به دلیل شیب افقی<sup>۵</sup>) و بنابراین حرکت املاح از جبهه رطوبتی پیروی نماید.

بر اساس نتایج، میزان فسفر قابل‌استفاده در ساعات اولیه (۴ ساعت) و همچنین روز اول افزایش یافت (شکل ۷). باگذشت زمان و با افزایش عمق غلظت آن کاهش یافت (غلظت در نقطه ورودی، قسمت بالا سمت چپ هر گراف)، اما بافاصله از قطره‌چکان و به‌صورت افقی افزایش یافت. این نتایج نشان می‌دهد که ابتدا فسفر به‌صورت عمودی حرکت نموده و پس از یک روز حرکت افقی آن بیشتر شده است. این پدیده برای ذرت نسبت به سیب‌زمینی بسیار بیشتر و مشهودتر در مقایسه با منطقه بدون گیاه است. در زمان طولانی‌تر (بعد از ۱۶۰۰ ساعت) حرکت افقی-سطحی در سیب‌زمینی بیشتر بود. به‌طور کلی، غلظت فسفر قابل‌استفاده تغییرات افقی بیشتری (تغییرات افقی بیش از ۱۵ سانتی‌متری نسبت به محل قطره‌چکان یا منبع ورود کود) نسبت به فسفر محلول نشان داد. با توجه به اینکه فسفر محلول بخشی از فسفر قابل‌استفاده است، می‌توان استنباط نمود که فسفر پخش‌شده به‌صورت افقی نسبت به فسفوری که به عمق حرکت کرده است، برای مدت طولانی‌تری قابلیت استفاده دارد. این امر ممکن است به دلیل وجود بیشتر مواد آلی در لایه‌های سطحی خاک باشد که از طریق برهمکنش با فسفر، از رسوب آن جلوگیری کرده و برای مدت طولانی‌تری قابلیت دسترسی آن را حفظ می‌نمایند.

در مرحله دوم کود دهی، قسمت بدون گیاه مقادیر بیشتری از فسفر قابل‌استفاده را نشان می‌دهد که باگذشت زمان جریان عمودی و افقی فسفر دیده می‌شود. به تعادل رسیدن خاک با مقادیر غلظت ورودی می‌تواند عامل این روند باشد. در مرحله دوم کوددهی، در ذرت و سیب‌زمینی میزان فسفر در زمان‌های اولیه بیشتر و سپس کاهش یافت. به غیر چند ساعت اول پس از آبیاری و کودآبیاری روند تغییرات فسفر در گیاه ذرت و سیب‌زمینی کاملاً متفاوت است. نتایج همچنین نشان داد که پس از ۹۸ ساعت تغییرات میزان فسفر چه به‌صورت افقی و چه عمودی در گیاه سیب‌زمینی و ذرت مشابه بود اما باگذشت زمان تغییرات فسفر این دو گیاه به‌طور معنی‌داری متفاوت شد (بالاخص برای زمان ۱۶۳۲ ساعت). این تفاوت‌ها در زمان کودآبیاری دوم بسیار بیشتر و قابل‌تامل‌تر است زیرا در قسمت بدون گیاه میزان غلظت فسفر بسیار زیاد شده و تغییرات آن با زمان کمتر می‌شود. در حقیقت غلظت فسفر با توجه به نیاز گیاهی و جذب گیاه در زمان‌های اولیه کودآبیاری دوم سبب تفاوت در میزان غلظت‌ها در دو گیاه است. هرچند به نظر می‌رسد مقدار فسفر قابل‌استفاده از حد کفایت (۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بیشتر است. نتایج تحقیقی نشان داد که غلظت فسفر در محل

<sup>5</sup> Horizontal water potential gradients



فاصله افقی از قطره چکان (سانتیمتر)

شکل ۷- غلظت فسفر قابل‌استفاده (اولسن) در زمان‌های مختلف بعد از کوددهی (۴، ۲۴، ۹۸، ۶۲۴ و ۱۶۳۲ ساعت (کودآبیاری اول) و ۴، ۲۴، ۹۸، ۶۲۴ و ۹۶۰ ساعت (کودآبیاری دوم)) برای ناحیه بدون گیاه، سیب‌زمینی و ذرت. نقاط سیاه مشخص شده در شکل‌ها نشان‌دهنده نقاط نمونه‌برداری است.

Figure 7. Available phosphorus concentration (Olsen) at different times after fertilization (4, 24, 98, 624, and 1632 hours (after first fertilization) and 4, 24, and 960 hours (after second fertilization)) for the uncultivated area, potato, and maize. The black points marked in the figures indicate the sampling points.

## پتاسیم محلول، تبادلی و غیر تبادلی در ناحیه بدون گیاه، کشت سیب‌زمینی و ذرت

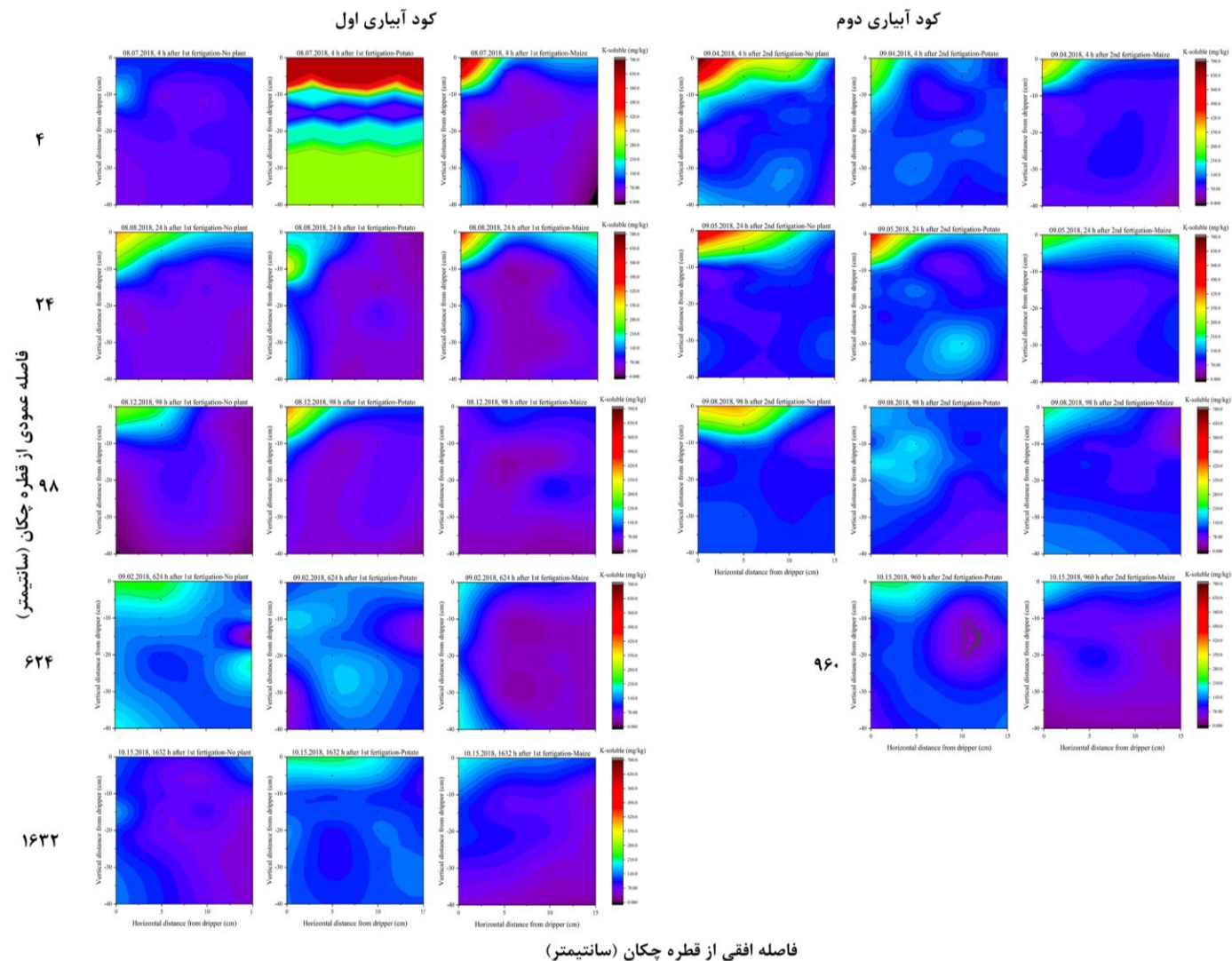
نتایج تغییرات زمانی و مکانی غلظت گونه‌های مختلف پتاسیم (محلول، تبادلی و غیر تبادلی) در زمان‌های مختلف برای خاک تحت کشت ذرت، سیب‌زمینی و فاقد کشت/شاهد در شکل-های ۸-۱۰ آمده است. به‌طور کلی با توجه به غلظت کودی اعمال‌شده، تغییرات غلظت پتاسیم در فواصل افقی و عمودی نیز متأثر از مقادیر آب و حرکت آن است. در زمان کوتاه بعد از کودآبیاری اول (۹۸ ساعت پس از کوددهی) میزان پتاسیم محلول و قابل‌استفاده به‌صورت افقی و عمودی از محل قطره‌چکان افزایش‌یافته و این مقدار برای خاک فاقد کشت و تحت کشت سیب‌زمینی نسبت به کشت ذرت مشهودتر است. برخلاف فسفر، پتاسیم محلول و تبادلی با گذر زمان تغییرات مکانی یکسانی را نشان دادند (شکل‌های ۸ و ۹). اگر چه عمده تغییرات پتاسیم محلول نهایتاً تا ۱۰ سانتی‌متری فاصله عمودی (عمقی) از قطره‌چکان (منبع کود) بود اما پتاسیم قابل‌استفاده تا ۲۰ سانتی‌متری عمقی تغییرات مشهودی نشان داد. همان‌طور که بیان شد توزیع پتاسیم متناسب با توزیع جبهه رطوبتی است و با کاهش حرکت جبهه رطوبتی توزیع پتاسیم نیز کاهش می‌یابد. مطالعه Nie و همکاران (۲۰۲۱) نشان داد که پتاسیم در ۱۰ سانتی‌متری افقی کودآبیاری شده و در ۳۶۰ دقیقه ابتدایی (۶ ساعت اول) توزیع می‌یابد و حرکت افقی/جانبی بیشتر از حرکت عمودی و کمتر از ۱۵ سانتی‌متری از محل کودآبیاری گزارش شد (Nie et al., 2021).

با ورود آب و افزایش رطوبت حرکت جبهه رطوبتی تسریع شده و زمان جذب پتاسیم توسط کلونیدهای خاک کاهش می‌یابد؛ بنابراین در زمان‌های اولیه حرکت پتاسیم بیشتر و سریع‌تر است. می‌توان بیان نمود که با افزایش غلظت ورودی نمک و مقدار جریان آب، املاح می‌توانند حرکت یا توزیع عمودی و افقی بیشتری داشته باشند. از آنجا که کوددهی یک ساعت پس از شروع آبیاری رخ داده است، می‌توان گفت که مکش خاک (پتانسیل ماتریک) در جهت عمودی نسبت به جانبی با افزایش رطوبت کاهش‌یافته و سبب کاهش حرکت جبهه رطوبتی و حرکت املاح به‌صورت عمودی شده است. با مرطوب شدن اولیه خاک شاید سرعت حرکت آب و محلول کودی کمتر و زمان لازم برای جذب در سطوح کلونیدهای خاک فراهم آمده است. علاوه بر آن مقدار آب ورودی (حجم کودآبیاری) نیز می‌تواند بر حرکت املاح پتاسیم و فسفر مؤثر بوده باشد (حجم کمتر در نتیجه حرکت کمتر در زمان‌های اولیه کودآبیاری). Nie و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه حرکت پتاسیم و شبیه‌سازی آن در

سیستم غرقابی جوی و پشته نشان دادند که پتاسیم نهایتاً در ۲۳-۲۶ سانتی‌متر عمودی و ۲۵-۲۷ سانتی‌متر افقی از سطح خاک در پشته توزیع می‌یابد. آن‌ها همچنین گزارش دادند که با افزایش غلظت تا چهار برابر، میزان افزایش حرکت افقی ۹٪ و حرکت عمودی ۸/۴٪ بود که تنها معادل ۱ سانتی‌متر بود. این نتیجه می‌تواند نشان‌دهنده این باشد که غلظت تأثیر کمی بر حرکت نمک دارد. نتایج به‌دست‌آمده با یافته‌های محققان دیگر نیز تطابق دارد (Hanson, (Ebrahimian et al., 2012; Zhang et al., 2012) و همکاران (۲۰۰۶) نتایج مشابهی برای سیستم قطره‌ای سطحی و زیرسطحی گزارش کردند و حرکت عمودی پتاسیم را حدود ۲۰ سانتی‌متر و حرکت افقی را ۳۵ سانتی‌متر از محل قطره‌چکان شبیه‌سازی نمودند. Grecco و همکاران (۲۰۱۹) حرکت بیشتر افقی/جانبی پتاسیم را نسبت به عمودی گزارش دادند و رفتار و حرکت پتاسیم را پایدار و ثابت دانستند با توجه به شکل‌های ۸ و ۹، به نظر می‌رسد توزیع و حرکت افقی پتاسیم (محلول و تبادلی) در کشت ذرت بیشتر از سیب‌زمینی است. این موضوع برای پتاسیم تبادلی در کشت ذرت بیشتر صدق می‌کند. در خاک تحت کشت ذرت و سیب‌زمینی میزان تغییرات پتاسیم در مرحله دوم کودآبیاری بسیار بیشتر از خاک فاقد کشت است. توزیع/حرکت عمودی در منطقه کشت شده کمتر از خاک بدون گیاه است. احتمالاً جذب عناصر معدنی توسط گیاهان موجب بروز این تفاوت‌هاست. به‌طور کلی نتایج نشان می‌دهد که پتاسیم قابل‌استفاده در منطقه رشد ریشه هم برای سیب‌زمینی و هم برای ذرت تا مقادیر بیش از ۳۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم پس از ۹۸ ساعت در کوددهی اول حاصل شد. نتایج نشان می‌دهد در زمان ۱۶۳۲ ساعت پس از کوددهی اول و ۹۶۰ ساعت پس از کوددهی دوم، حرکت افقی و جانبی آب به‌ویژه بر روی پشته در کشت سیب‌زمینی سبب افزایش بیشتر غلظت پتاسیم در ۵ سانتی‌متری سطح خاک شد. پس از کوددهی دوم مقادیر محلول و تبادلی در خاک بدون گیاه بیشتر بود هرچند توسعه افقی بیشتری نسبت به عمودی را نشان داد. تفاوت حدود ۲۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم پتاسیم تبادلی در ناحیه بدون کشت و کشت‌شده نشان‌دهنده میزان جذب پتاسیم توسط گیاهان کشت‌شده است که این میزان جذب در سیب‌زمینی در اواخر دوره رشد احتمالاً بیشتر بوده است. این موضوع برای ذرت در زمان‌های کوددهی دوم بیشتر صدق می‌کند. لذا از آنجا که زمان بهینه کوددهی به تغییرات غلظت و نیاز گیاه وابسته است، پیش‌بینی حرکت و برآورد دقیق پتاسیم، نقش تعیین‌کننده‌ای در ارتباط با کارایی مصرف کود مهم دارد (Jalali and Rowell, 2009). بنابراین عرضه کافی پتاسیم و فسفر

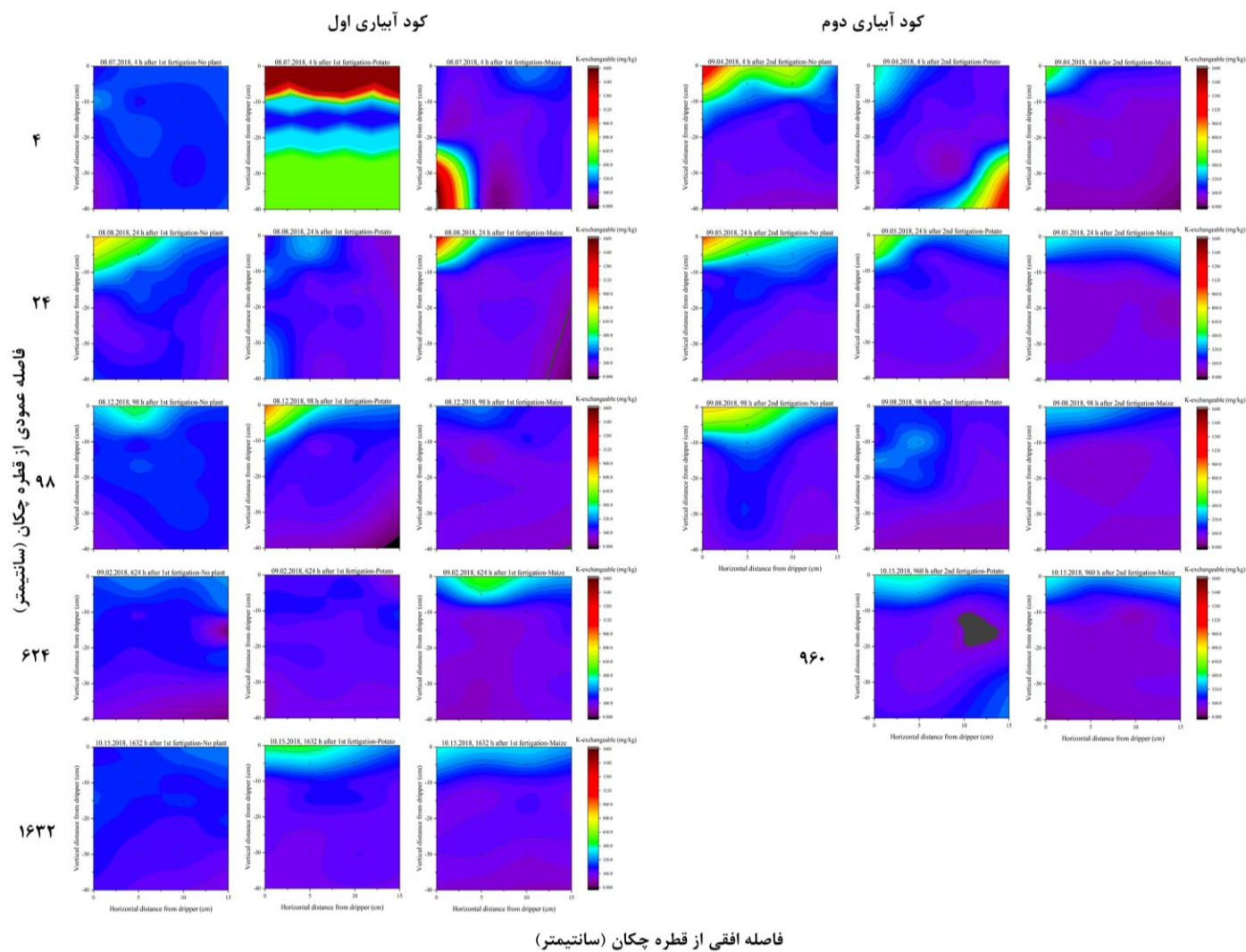
در زمان و مکان مناسب برای دستیابی به عملکرد و کیفیت بهینه محصول ضروری است.

در مورد پتاسیم غیرتبادلی تغییرات قابل ملاحظه‌ای مرتبط با کوددهی دور اول در زمان‌های ابتدایی (تا ۹۸ ساعت) مشاهده نشد؛ اما از زمان ۶۲۴ ساعت به بعد پتاسیم غیرتبادلی مقداری کاهش نشان داد که احتمالاً متناظر و متناسب با پتاسیم تبادلی و محلول و جذب گیاه است. به‌طورکلی بعد از کوددهی دوم مقادیر پتاسیم تبادلی نسبت به قبل از آن افزایش یافت. به‌طورکلی می‌توان فرآیند جذب و رهاسازی (تعادلی میان فاز محلول-تبادلی و غیر تبادلی) را در عمل و در طبیعت مشاهده نمود که احتمالاً قابل مقایسه با رفتار سنتیکی در شرایط آزمایشگاه و سیستم بسته باشد. باز هم باید یادآوری نمود که تغییرات مکانی می‌تواند تأثیر بسزایی در تحلیل اطلاعات و مصورسازی نتایج داشته باشد که تأثیر آن در ارائه نتایج این پژوهش نیز دور از انتظار نیست (زمان‌های پایانی کوددهی دور اول و دوم کشت ذرت، شکل ۱۰).



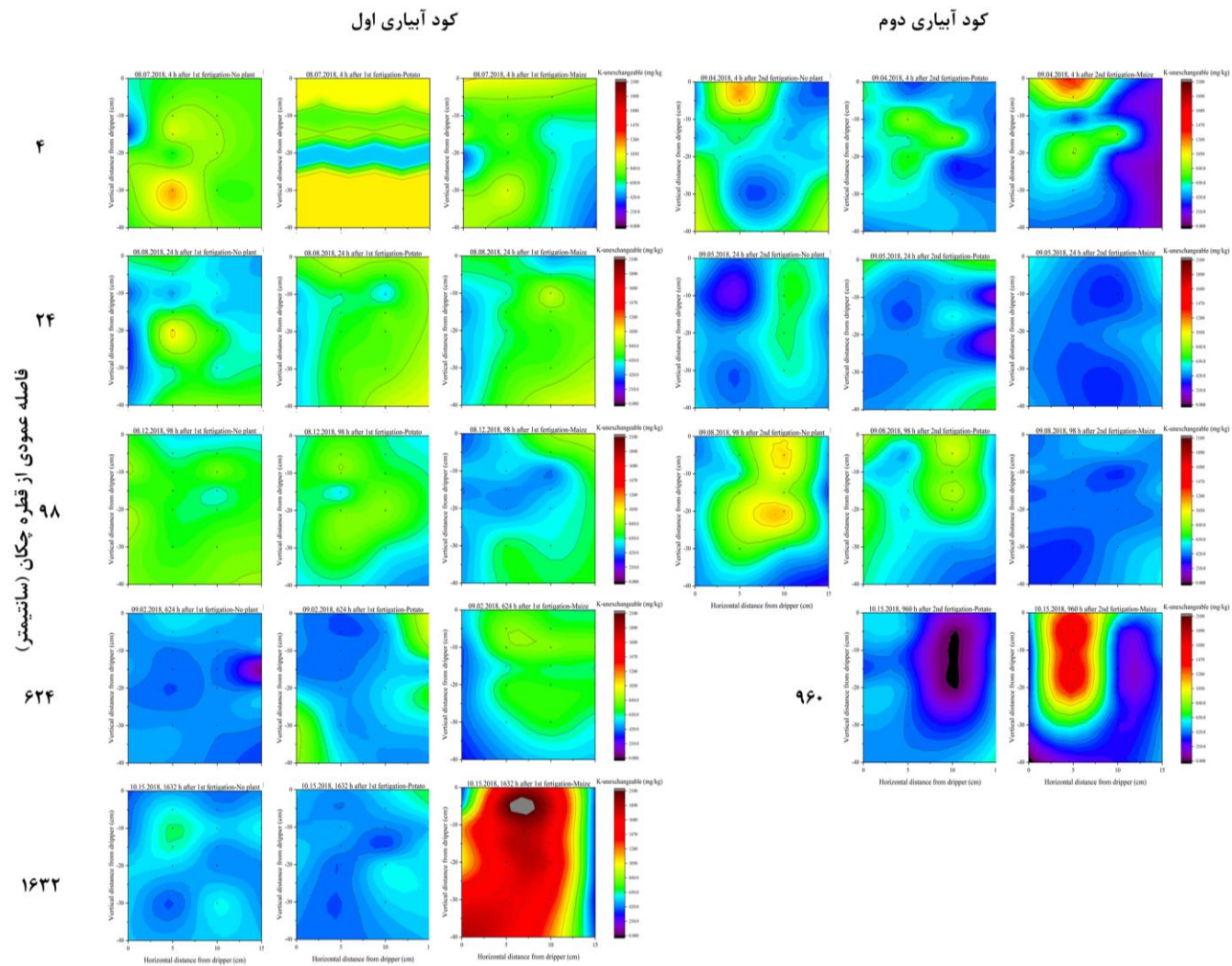
شکل ۸- غلظت پتاسیم محلول در زمان‌های مختلف بعد از کوددهی (۴، ۲۴، ۹۸، ۶۲۴ و ۱۶۳۲ ساعت (کودآبیاری اول) و ۴، ۲۴، ۹۸، ۹۶۰ ساعت (کودآبیاری دوم)) برای ناحیه بدون گیاه، سیب‌زمینی و ذرت. نقاط سیاه مشخص شده در شکل‌ها نشان‌دهنده نقاط نمونه‌برداری است.

Figure 8. Soluble potassium concentration at different times after fertilization (4, 24, 98, 624, and 1632 hours (after first fertigation) and 4, 24, 98, and 960 hours (after second fertigation)) for the uncultivated area, potato, and maize. The black points marked in the figures indicate the sampling points.



شکل ۹- غلظت پتاسیم تبادلی در زمان‌های مختلف بعد از کوددهی (۴، ۲۴، ۹۸، ۹۶۰ ساعت (کودآبیاری دوم)) برای ناحیه بدون گیاه، سیب‌زمینی و ذرت. نقاط سیاه مشخص شده در شکل‌ها نشان دهنده نقاط نمونه‌برداری است.

Figure 9. Exchangeable potassium concentration at different times after fertilization (4, 24, 98, 624, and 1632 hours (after first fertilization) and 4, 24, 98, and 960 hours (after second fertilization)) for the uncultivated area, potato, and maize. The black points marked in the figures indicate the sampling points.



فاصله افقی از قطره چکان (سانتیمتر)

شکل ۱۰- غلظت پتاسیم غیر تبادلی/کل در زمان‌های مختلف بعد از کوددهی (۴، ۲۴، ۹۸، ۶۲۴ و ۱۶۳۲ ساعت (کودآبیاری اول) و ۴، ۲۴، ۹۸، ۶۲۴ و ۹۶۰ ساعت (کودآبیاری دوم)) برای ناحیه بدون گیاه، سیب‌زمینی و ذرت. نقاط سیاه مشخص شده در شکل‌ها نشان‌دهنده نقاط نمونه‌برداری است.

Figure 10. Non-exchangeable potassium concentration at different times after fertilization (4, 24, 98, 624, and 1632 hours (after first fertigation) and 4, 24, 98, and 960 hours (after second fertigation)) for the uncultivated area, potato, and maize. The black points marked in the figures indicate the sampling points.

### نتیجه‌گیری

این مطالعه به منظور ارزیابی پویایی فسفر و پتاسیم در کشت سیب‌زمینی و ذرت تحت سیستم آبیاری قطره‌ای در مزرعه موسسه خاک و آب انجام شد. در این تحقیق سعی شد که کلیه عملیات و مدیریت معمول که توسط کشاورز اعمال می‌گردد، بدون تغییر برای زمین و کشت‌های مورد مطالعه لحاظ گردد تا بتوان بهترین نتیجه کاربردی را حصول نمود. نتایج این مطالعه نشان داد که دینامیک انتقال و توزیع فسفر و پتاسیم در خاک تحت سیستم آبیاری قطره‌ای به نوع گیاه وابسته است. حرکت عمودی فسفر حداکثر تا ۱۵ سانتی‌متر و حرکت افقی/جانبی آن در سیستم جوی و پشته حداکثر تا ۳۵ سانتی‌متر از قطره‌چکان محدود شد. پتاسیم توانست تا عمق ۲۰ سانتی‌متر و شعاع افقی بیش از ۳۵ سانتی‌متر از نقطه تزریق حرکت کند. توزیع هر دو عنصر به‌طور معناداری از الگوی جبهه رطوبتی خاک پیروی کرد. افزایش دفعات کوددهی با غلظت‌های کمتر، به‌طور کلی منجر به فراهمی بهتر عناصر غذایی

برای گیاهان شد. این رویکرد به‌ویژه برای گیاهان زراعی با سیستم ریشه‌ای سطحی (۰-۴۰ سانتی‌متر) مانند ذرت و سیب‌زمینی بسیار حائز اهمیت است و می‌تواند ضمن افزایش کارایی مصرف کود، از تجمع املاح و ایجاد آلودگی نیز بکاهد. به کارگیری مدل‌های شبیه‌سازی مانند HYDRUS برای آنالیز سناریوهای مختلف مدیریتی (مانند تغییر غلظت یا زمان‌بندی کوددهی) می‌تواند درک بهتری از روند توزیع و فراهمی عناصر ارائه دهد. این امر می‌تواند از دوباره‌کاری‌های پرهزینه و زمان‌بر آزمایشات مزرعه‌ای بکاهد و به‌عنوان یک مزیت کلیدی برای استفاده از رویکرد مدل‌سازی در مطالعات مدیریت خاک و آب تلقی گردد.

### تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از گزارش فنی به شماره فروست ۶۷۰۵۵ است. نویسندگان از کلیه دست‌اندرکاران و همکاران موسسه تحقیقات خاک و آب کمال تشکر را دارند.

## References





- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome 300, D05109.
- Ajdary, K., Singh, D.K., Singh, A.K. and Khanna, M., 2007. Modelling of nitrogen leaching from experimental onion field under drip fertigation. *Agricultural water management*, 89(1-2), pp.15-28.
- Barber, S.A., 1995. Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach. John Wiley & Sons.
- Bouyoucos, G.J., 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils 1. *Agronomy journal* 54, 464-465. <https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>
- Chtouki, M., Naciri, R., Oukarroum, A., 2024. A review on phosphorus drip fertigation in the Mediterranean region: Fundamentals, current situation, challenges, and perspectives. *Heliyon* 10, e25543. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25543>
- Coelho, E.F., Or, D., 1999. Root distribution and water uptake patterns of corn under surface and subsurface drip irrigation. *Plant and Soil* 206, 123-136. <https://doi.org/10.1023/A:1004325219804>
- Corwin, D.L., 2021. Climate change impacts on soil salinity in agricultural areas. *European Journal of Soil Science* 72, 842-862. <https://doi.org/10.1111/ejss.13010>
- Ebrahimian, H., Liaghat, A., Parsinejad, M., Playán, E., 2012. Distribution and loss of water and nitrate under alternate and conventional furrow fertigation. *Spanish Journal of Agricultural Research* 10, 849-863. <https://doi.org/10.5424/sjar/2012103-585-11>
- Gärdenäs, A.I., Hopmans, J.W., Hanson, B.R., Šimůnek, J., 2005. Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation. *Agricultural Water Management* 74, 219-242. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.11.011>
- Gheysari, M., Pirnajmedin, F., Movahedrad, H., Majidi, M.M., Zareian, M.J., 2021. Crop yield and irrigation water productivity of silage maize under two water stress strategies in semi-arid environment: Two different pot and field experiments. *Agricultural Water Management* 255, 106999. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106999>
- Grecco, K.L., de Miranda, J.H., Silveira, L.K., van Genuchten, M.T., 2019. HYDRUS-2D simulations of water and potassium movement in drip irrigated tropical soil container cultivated with sugarcane. *Agricultural Water Management* 221, 334-347. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.05.010>
- Guido, V., Finzi, A., Ferrari, O., Riva, E., Quílez, D., Herrero, E., Provolo, G., 2020. Fertigation of Maize with Digestate Using Drip Irrigation and Pivot Systems. *Agronomy* 10, 1453. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101453>
- Hafeez, A., Ali, S., Ma, X., Tung, S.A., Shah, A.N., Ahmad, S., Chattha, M.S., Souliyanonh, B., Zhang, Z., Yang, G., 2019. Photosynthetic characteristics of boll subtending leaves are substantially influenced by applied K to N ratio under the new planting model for cotton in the Yangtze River Valley. *Field Crops Research* 237, 43-52. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.04.015>
- Hanson, B.R., Šimůnek, J., Hopmans, J.W., 2006. Evaluation of urea-ammonium-nitrate fertigation with drip irrigation using numerical modeling. *Agricultural Water Management* 86, 102-113. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.06.013>
- Havlin, J.L., 2014. Soil fertility and nutrient management. Upper Saddle River, NJ, USA, 460-469.
- Jalali, M., Rowell, D., 2009. Potassium leaching in undisturbed soil cores following surface applications of gypsum. *Environmental Geology* 57, 41-48. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1280-6>
- Khavazi, K., Balali, M., Bazargan, K., Tehrani, M., Rezaei, H., Asadi Rahmani, H., Gheibi, M., Davoodi, M., Saadat, S., Moshiri, F., 2014. Comprehensive soil fertility and plant nutrition program 2014-2025. Soil and Water Research Institute Press, Karaj, Iran.
- Kuldeep, Singh, A.K., Sajwan, A., Kamboj, A.D., Joshi, G., Gautam, R., Kumar, M., Mani, G., Lal, S., Kaur, J., 2024. Advances in precision nutrient management of fruit crops. *Journal of Plant Nutrition* 47, 3251-3271.
- Li, W., Gu, X., Du, Y., Zheng, X., Lu, S., Cheng, Z., Cai, W., Chang, T., 2023. Optimizing nitrogen, phosphorus, and potassium fertilization regimes to improve maize productivity under double ridge-furrow planting with full film mulching. *Agricultural Water Management* 287, 108439. <https://doi.org/10.1080/01904167.2024.2377411>

20. Manning, D.A., Baptista, J., Limon, M.S. and Brandt, K., 2017. Testing the ability of plants to access potassium from framework silicate minerals. *Science of the total environment*, 574, pp.476-481.
21. Mohamadzade, F., Gheysari, M., Eshghizadeh, H., Tabatabaei, M.S., Hoogenboom, G., 2022. The effect of water and nitrogen on drip tape irrigated silage maize grown under arid conditions: Experimental and simulations. *Agricultural Water Management* 271, 107821. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107821>
22. Nie, W.-B., Nie, K.-K., Li, Y.-B., Ma, X.-Y., 2021. HYDRUS-2D Simulations of nitrate nitrogen and potassium transport characteristics under fertilizer solution infiltration of furrow irrigation. *Water Supply* 21, 2665-2680. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.266>
23. Page, A., 1965. Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America.
24. Phogat, V., Pitt, T., Petrie, P., Šimůnek, J., Cutting, M., 2023. Optimization of irrigation of wine grapes with brackish water for managing soil salinization. *Land* 12, 1947. <https://doi.org/10.3390/land12101947>
25. Phogat, V., Skewes, M.A., Cox, J.W., Sanderson, G., Alam, J., Šimůnek, J., 2014. Seasonal simulation of water, salinity and nitrate dynamics under drip irrigated mandarin (*Citrus reticulata*) and assessing management options for drainage and nitrate leaching. *Journal of Hydrology* 513, 504-516. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.008>
26. Rajj, I., Šimůnek, J., Ben-Gal, A., Lazarovitch, N., 2016. Water flow and multicomponent solute transport in drip-irrigated lysimeters. *Water Resources Research* 52, 6557-6574. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.07.016>
27. Rezaei, M., 2016. Characterization and modeling of water flow in sandy soils for irrigation optimization. Ghent University, Faculty of Bioscience Engineering, Ghent, Belgium.
28. Rezaei, M., Movahedi Naeini, S.A.R., 2009a. Effects of ammonium and natural zeolite on potassium adsorption and desorption kinetics in a loess soil. *International Journal of Soil Science*. *International Journal of Soil Science* 4, 27-45. DOI: 10.3923/ijss.2009.27.45
29. Rezaei, M., Movahedi Naeini, S.A.R., 2009b. Kinetics of potassium desorption from a loess soil, soil mixed with zeolite, and the Clinoptilolite Zeolite as influenced by calcium and ammonium. *Journal of Applied Science* 9, 3335-3342. DOI: 10.3923/jas.2009.3335.3342
30. Rezaei, M., Seuntjens, P., Joris, I., Wesley Boëne, W., Van Hoey, S., Campling, P., Cornelis, W., 2016. Sensitivity of water stress in a two-layered sandy grassland soil to variations in groundwater depth and soil hydraulic parameters. *Hydrology and Earth System Sciences* 20, 487-503. <https://doi.org/10.5194/hess-20-487-2016>, 2016.
31. Selim, T., Bouksila, F., Hamed, Y., Berndtsson, R., Bahri, A., Persson, M., 2018. Field experiment and numerical simulation of point source irrigation with multiple tracers. *PLoS one* 13, e0190500. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190500>
32. Shahbazi, K., Mostafa Marzi, Mohammadi, M.H., Asadi, H., Fathi Gerdlidani, A., Hasheminasab, K.S., Toluee, R., Behesti, M., Avizhgan, A., Cheraghi, M., 2024. Methods of Soil Analysis; Sampling, Chemical and Physical Methods. *Soil and Water Research Institute* 1, 1074.
33. Sheldrick, W.F., Syers, J.K. and Lingard, J., 2002. A conceptual model for conducting nutrient audits at national, regional, and global scales. *Nutrient cycling in Agroecosystems*, 62(1), pp.61-72.
34. Šimůnek, J., Brunetti, G., Jacques, D., van Genuchten, M.T., Šejna, M., 2024. Developments and applications of the HYDRUS computer software packages since 2016. *Vadose Zone Journal* 23, e20310. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20310>
35. Singh, D., Rajput, T., Sikarwar, H., Sahoo, R., Ahmad, T., 2006. Simulation of soil wetting pattern with subsurface drip irrigation from line source. *Agricultural water management* 83, 130-134. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.11.002>
36. Surendran, U., Madhava Chandran, K., 2022. Development and evaluation of drip irrigation and fertigation scheduling to improve water productivity and sustainable crop production using HYDRUS. *Agricultural Water Management* 269, 107668. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107668>
37. Tehrani, M., Moshiri, F., Gheibi, M., Rezaei, H., Keshavarz, P., Davoodi, M., Ziaei, A., Noorgholipour, F., Majidi, A., Hosseini, S., 2015. Comprehensive Soil Fertility and Plant Nutrition Program 2014-025. *Agricultural Research, Education and Extension Organization*. *Soil and Water Research Institute* 2.

38. Visconti, F., de Paz, J.M., 2012. Prediction of the soil saturated paste extract salinity from extractable ions, cation exchange capacity, and anion exclusion. *Soil Research* 50, 536-550. <https://www.thefreelibrary.com/Prediction+of+the+soil+saturated+paste+extract+salinity+from...-a0312725419>
39. Walkley, A., Black, I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science* 37, 29-38. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
40. Zhang, J.-j., Li, J.-s., Zhao, B.-q., Li, Y.-t., 2015. Simulation of water and nitrogen dynamics as affected by drip fertigation strategies. *Journal of Integrative Agriculture* 14, 2434-2445. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(15\)61231-X](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(15)61231-X)
41. Zhang, S., Wang, L., Chen, S., Fan, B., Huang, S., Chen, Q., 2022. Enhanced phosphorus mobility in a calcareous soil with organic amendments additions: Insights from a long term study with equal phosphorus input. *Journal of Environmental Management* 306, 114451. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114451>
42. Zhang, Y., Wu, P., Zhao, X., Li, P., 2012. Evaluation and modelling of furrow infiltration for uncropped ridge–furrow tillage in Loess Plateau soils. *Soil Research* 50, 360-370. <https://www.thefreelibrary.com/Evaluation+and+modelling+of+furrow+infiltration+for+uncropped...-a0303450484>



## Soil Potassium Dynamics and Its Relationship with Clay Mineralogy in Agricultural Soils of the Shahrekord Piedmont Plain

Marzieh Barati Zanyani<sup>a\*</sup> , Alireza Hossienpur<sup>a</sup> , Mohammad Hasan Salehi<sup>a</sup> , and Azam Jafari<sup>b</sup> 

<sup>a</sup> Department of Soil Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

<sup>b</sup> Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

### Article Info

#### Article Type

Research Article

#### Received

September 02, 2025

#### Revised

October 29, 2025

#### Accepted

November 08, 2025

#### Published online

December 20, 2025

#### Keywords

Available Potassium,  
Mica,  
Non-exchangeable  
Potassium,  
Piedmont Plain,  
Smectite.

\*Corresponding author's email

[marziehbarati99@yahoo.com](mailto:marziehbarati99@yahoo.com)

### Extended Abstract

**Background and Objectives:** The identification of the type and composition of clay minerals in soil is of particular importance, as these minerals play a fundamental role in potassium dynamics and in the soil's capacity to supply this essential element to plants. Clay minerals can influence the uptake, retention, and release of potassium, and therefore play a crucial role in fertilization management and in maintaining soil fertility. The present study aims to investigate the relationship between different forms of soil potassium, including soluble, exchangeable, and non-exchangeable potassium, as well as the amount of released non-exchangeable potassium, in relation to the clay mineral composition of agricultural soils.

**Materials and Methods:** Fifteen soil samples were collected from the 0–30 cm depth of agricultural soils in the Shahrekord Piedmont Plain, based on variations in exchangeable potassium, non-exchangeable potassium, cation exchange capacity, and clay content. The physical and chemical properties of the soils were analyzed. In addition, the exchangeable potassium of the soils was determined using 1 N ammonium acetate, and the non-exchangeable potassium was determined using 1 M boiling nitric acid. The amount of non-exchangeable potassium released after 2,017 hours was measured using the sequential extraction method with 0.01 M calcium chloride (CaCl<sub>2</sub>). The composition of clay minerals was examined. The clay samples were saturated with potassium and magnesium, and to identify the types of clay minerals, Mg, Mg–ethylene glycol, Mg–glycerol, K, and K-heated treatments at 110, 350, and 550 °C were analyzed using an X-ray diffraction (XRD) instrument.

**Results:** The results showed that the range of soluble, exchangeable, and non-exchangeable potassium concentrations was 11.5–99.7, 108.5–612.7, and 491–2065 mg kg<sup>-1</sup>, respectively. The range of non-exchangeable potassium released after 2017 hours varied from 225.5 to 479.0 mg kg<sup>-1</sup>. The dominant soil minerals included: micas, chlorites, kaolinite, smectites, quartz, and a small amount of mixed mica–chlorite minerals, with variations in their relative abundances. In soils with similar clay and silt contents, differences in potassium release behavior are mainly attributed to the type and proportion of clay minerals. Soils with the lowest levels of exchangeable and non-exchangeable potassium exhibited the highest non-exchangeable potassium release, whereas soils with high non-exchangeable potassium content showed

a lower release percentage. The results showed that different forms of potassium had significant relationships with certain soil properties. Soluble and non-exchangeable potassium, as well as the cumulative amount of non-exchangeable potassium released after 2017 hours, were positively correlated with electrical conductivity ( $r = 0.54^{**}$ ,  $r = 0.45^{**}$ ,  $r = 0.25^{**}$ ); soluble and non-exchangeable potassium were negatively correlated with cation exchange capacity ( $r = -0.18^*$ ,  $r = -0.26^*$ ); soluble potassium was positively correlated with organic matter ( $r = 0.21^*$ ); and exchangeable potassium was negatively correlated with calcium carbonate equivalent ( $r = -0.34^{**}$ ). The different forms of potassium and the amount of non-exchangeable potassium released after 2017 hours showed no significant correlation with the total clay content. Moreover, different forms of potassium and the amount of non-exchangeable potassium released after 2017 hours showed no significant correlation with total clay content, indicating that potassium dynamics in these soils are influenced more by the type and composition of clay minerals than by the clay content itself.

**Conclusion:** The results of this study indicated that potassium dynamics in the agricultural soils of the Shahrekord Piedmont are primarily influenced by the type and composition of clay minerals. In other words, the quantity and rate of non-exchangeable potassium release in soils depend more on the abundance and type of potassium-bearing minerals, such as micas and smectites, rather than on merely the total clay content. Soils with high smectite content exhibited faster non-exchangeable potassium release, whereas mica-rich soils had high non-exchangeable potassium content but a lower release rate. These findings highlight the importance of understanding clay mineralogy and the different forms of potassium for designing optimal potassium fertilization programs. To meet crop potassium requirements and avoid excessive fertilizer application, it is necessary to consider not only exchangeable and non-exchangeable potassium levels but also the clay mineral composition and the behavior of potassium release.

**Cite this article:** Barati Zanyani, M., Hossienpur, A., Salehi, M.H., And Jafari, A., 2025. Soil Potassium Dynamics and Its Relationship with Clay Mineralogy in Agricultural Soils of the Shahrekord Piedmont Plain. *Journal of Soil Research*, 39 (3), pp 287-302.



**DOI:** [10.22092/IJSR.2025.370593.786](https://doi.org/10.22092/IJSR.2025.370593.786)

**Publisher:** Soil Science Society of Iran

---



## پویایی پتاسیم خاک و ارتباط آن با کانی‌شناسی رس‌ها در خاک‌های زراعی دشت دامنه‌ای شهرکرد

مرضیه براتی زانیانی<sup>۱\*</sup>، علیرضا حسین‌پور<sup>۱</sup>، محمدحسن صالحی<sup>۱</sup> و اعظم جعفری<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

<sup>۲</sup> گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>شناسایی انواع کانی‌های رسی در خاک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا نقش تعیین‌کننده‌ای در پویایی پتاسیم و توانایی خاک در تأمین این عنصر برای گیاهان ایفا می‌کند. مطالعه حاضر با هدف بررسی رابطه بین شکل‌های مختلف پتاسیم (محلول، تبادل و غیرتبادلی) و مقدار پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده به‌عنوان تابعی از کانی‌شناسی رس، در خاک‌های زراعی انجام شد. بدین منظور، ۱۵ نمونه خاک براساس تنوع در مقدار پتاسیم تبادلی، پتاسیم غیرتبادلی، ظرفیت تبادل کاتیونی و درصد رس، از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری خاک‌های زراعی دشت دامنه‌ای شهرکرد جمع‌آوری شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، شکل‌های مختلف پتاسیم، مقدار آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی پس از ۲۰۱۷ ساعت به روش عصاره‌گیری متوالی و ترکیب کانی‌های رسی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که دامنه تغییرات مقدار پتاسیم محلول، تبادلی و غیرتبادلی، به‌ترتیب: ۹۹/۷-۱۱/۵، ۶۱۲/۷-۱۰۸/۵ و ۲۰۶۵-۴۹۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. مقدار پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده پس از ۲۰۱۷ ساعت نیز در دامنه، ۴۷۹/۰-۲۲۵/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر بود. کانی‌های غالب خاک، شامل؛ میکاها، کلریت‌ها، کائولینیت، اسمکتیت‌ها، کوارتز و کانی مختلط میکاها-کلریت‌ها بودند که از نظر مقدار نسبی تفاوت‌هایی با یکدیگر داشتند. در خاک‌هایی با مقدار رس و سیلت مشابه، تفاوت در رفتار آزادسازی پتاسیم عمدتاً ناشی از نوع و نسبت کانی‌های رسی است. فراوانی شکل‌های مختلف پتاسیم رابطه معناداری با برخی ویژگی‌های خاک داشت؛ غلظت پتاسیم محلول، غیرتبادلی و مقدار پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده پس از ۲۰۱۷ ساعت، با قابلیت هدایت الکتریکی همبستگی مثبت داشت (به‌ترتیب: <math>r=0/54^{**}</math>، <math>r=0/45^{**}</math> و <math>r=0/25^{**}</math>)، پتاسیم محلول و غیرتبادلی با ظرفیت تبادل کاتیونی همبستگی منفی (به‌ترتیب: <math>r=0/18^{**}</math> و <math>r=0/26^{**}</math>)، پتاسیم محلول با ماده آلی همبستگی مثبت (<math>r=0/21^{**}</math>) و پتاسیم تبادلی با کربنات کلسیم معادل همبستگی منفی (<math>r=0/34^{**}</math>) داشت. شکل‌های مختلف پتاسیم و مقدار پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده پس از ۲۰۱۷ ساعت با مقدار کل رس همبستگی معنی‌داری نداشتند، که نشان می‌دهد دینامیک پتاسیم در این خاک‌ها بیش از آنکه تحت تأثیر میزان رس باشد، تحت تأثیر نوع و ترکیب کانی‌های رسی قرار دارد.</p>	<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۱</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۰۷</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۷</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۲۹</p> <p>واژه‌های کلیدی اسمکتیت‌ها، پتاسیم تبادلی، پتاسیم غیرتبادلی، دشت دامنه‌ای، میکاها.</p> <p>*ایمیل نویسنده مسئول <a href="mailto:marziehbarati99@yahoo.com">marziehbarati99@yahoo.com</a></p>

استناد: براتی زانیانی، م.، حسین‌پور، ع.، صالحی، م.ح.، جعفری، ا.، ۱۴۰۴. پویایی پتاسیم خاک و ارتباط آن با کانی‌شناسی رس‌ها در خاک‌های زراعی

دشت دامنه‌ای شهرکرد. مقاله پژوهشی، نشریه پژوهش‌های خاک، (۳) ۳۹، ص ۲۸۷-۳۰۲.

DOI: 10.22092/IJSR.2025.370593.786



## مقدمه

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها تحت تأثیر ترکیب کانی‌های رسی و شرایط محیطی شکل می‌گیرند. نوع کانی‌های تشکیل‌دهنده خاک عمدتاً تحت تأثیر اقلیم، مواد مادری و عوامل محیطی است و به دلیل دارا بودن بار منفی و سطح ویژه بالا، نقش مهمی در جذب عناصر غذایی موردنیاز گیاه دارند. شناسایی کمی و کیفی و بررسی ترکیب ساختمانی آن‌ها، اطلاعات ارزشمندی درباره ظرفیت جذب، آزادسازی و تثبیت عناصر غذایی در خاک فراهم می‌کند (Dixon and Weed, 1992). کانی‌های رسی در خاک، تحت تأثیر هوادیدگی فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی قرار دارند و بر اساس این تأثیرات، می‌توان آن‌ها را به سه گروه تقسیم کرد: کانی‌هایی که بدون تغییر ساختاری از مواد مادری به ارث رسیده‌اند، کانی‌هایی که تحت تأثیر هوادیدگی و شرایط محیطی به کانی‌های دیگر تبدیل شده‌اند و کانی‌هایی که از سنتز مواد تخریب یافته از کانی‌های اولیه مختلف در خاک تشکیل می‌شوند (Gunal and Ransom, 2006). کانی‌های رسی موجود در خاک‌های خشک و نیمه‌خشک ایران شامل؛ اسمکتیت‌ها، کلریت‌ها، ایلیت، کائولینیت، پالی‌گورسکیت و ورمی کولایت‌ها هستند (Khormali and Abtahi, 2003).

پتاسیم به عنوان هفتمین عنصر فراوان در پوسته زمین، یکی از عناصر ضروری جهت رشد گیاهان است. این عنصر به چهار شکل محلول، تبادلی، غیرتبادلی و ساختمانی در خاک وجود دارد (Jini et al., 2024). پتاسیم محلول، پتاسیم موجود در محلول خاک است که با پتاسیم تبادلی خاک در حال تعادل است. پتاسیم تبادلی پتاسیمی است که توسط بارهای منفی کلوئیدهای آلی و معدنی نگهداری و به راحتی با کاتیون‌های دیگر در فاز محلول تبادل می‌شود (Mouhamad et al., 2016). بخش نسبتاً کوچکی از پتاسیم کل خاک تبادلی بوده و در خاک‌ها از کمتر از ۱۰۰ تا بیش از ۲۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم تغییر می‌کند (Knudsen et al., 1982). پتاسیم غیرتبادلی پتاسیمی است که به آسانی قابل تبادل نبوده و در زمان‌های کوتاه توسط محلول‌های نمکی آزاد نمی‌شود، ولی بخشی از آن با اسیدنیتریک مولار جوشان قابل استخراج است (Al-Kanani et al., 1984). نقش پتاسیم غیرتبادلی خاک در تأمین پتاسیم مورد نیاز گیاه به عوامل مختلفی مانند؛ نوع کانی، میزان پتاسیم در کانی، فراوانی کانی‌های پتاسیم‌دار و اندازه ذرات آن‌ها، مقدار پتاسیم قابل استفاده خاک، مقدار پتاسیم آزاد شده از بقایای گیاهی و غلظت پتاسیم در آب آبیاری بستگی دارد (Jalali, 2005). پتاسیم ساختمانی به شکلی از پتاسیم اطلاق می‌شود که جزئی از شبکه کریستالی کانی‌ها است. تعداد زیادی از کانی‌های حاوی پتاسیم شامل فلدسپارها و اغلب سیلیکات‌ها ممکن است حاوی چنین شکلی از پتاسیم باشند (Mustscher, 1995). این

شکل از پتاسیم برای گیاهان غیرقابل استفاده است و آزادسازی آن، تنها از طریق فرآیند هوادیدگی امکان‌پذیر است. شدت این فرآیند به عواملی مانند؛ pH خاک، نوع کانی‌های رسی و نوع کاتیون موجود بستگی دارد که در طولانی‌مدت، منجر به انتقال پتاسیم به مخازن با دسترسی کند می‌شود (Kaur, 2019). با این حال، این فرآیند بسیار کند است و نمی‌تواند به‌تنهایی نیاز پتاسیمی گیاهان زراعی را تأمین کند (Prajapati and Modi, 2012).

در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌ویژه به علت وجود کانی‌های حاوی پتاسیم، مقادیر قابل توجهی پتاسیم غیرتبادلی یافت می‌شود (Murrell et al., 2021). حتی حضور مقادیر نسبتاً کم این کانی‌ها، می‌تواند قابلیت دسترسی مؤثر پتاسیم را افزایش دهد. اهمیت این کانی‌ها، ناشی از توانایی آن‌ها در جذب و آزادسازی یون‌های پتاسیم از جایگاه‌های بین‌لایه‌ای است (Barre et al., 2008). در کانی‌های میکایی، بار لایه‌ای توسط کاتیون پتاسیم بین لایه‌ای خنثی می‌شود. این کانی‌ها غیرقابل انبساط و انقباض بوده و واکنش‌های تبادل سطحی آن‌ها محدود به سطوح خارجی یا لبه‌های شکسته کانی است (Bohn et al., 1985). هوادیدگی میکاها از کناره‌های جانبی کانی آغاز شده و به مرور زمان به سمت داخل پیشرفت می‌کند که در نتیجه آن پتاسیم بین‌لایه‌ای آزاد می‌شود (Bertsch and Thomas, 1985). با افزایش هوادیدگی میکاها، درصد پتاسیم آن کاهش و میزان آب بین لایه‌ای افزایش می‌یابد و کانی‌هایی چون ایلیت‌ها به وجود می‌آیند و با ادامه هوادیدگی ورمی‌کولایت‌ها و اسمکتیت‌ها به وجود می‌آیند. کانی ورمی‌کولایت‌ها، دارای بار لایه‌ای بیشتر و پتاسیم بیشتری بوده و خاصیت انبساط‌پذیری کمتری نسبت به اسمکتیت‌ها دارند. کانی اسمکتیت‌ها به علت مقدار نسبتاً کم بار لایه‌ای، دارای خاصیت انبساط‌پذیری نسبتاً بالایی هستند و توانایی تثبیت پتاسیم را ندارند (Sparks, 1987). به همین دلیل، آزادسازی پتاسیم از اسمکتیت‌ها نسبت به میکاها و ورمی‌کولایت‌ها سریع‌تر انجام می‌شود.

توزیع شکل‌های پتاسیم در خاک به ویژگی‌های مختلفی شامل؛ بافت خاک، مقدار و نوع کانی‌های رسی، مقدار ماده آلی خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک، نوع کاربری اراضی، رژیم رطوبتی و حرارتی خاک و تکامل خاک بستگی دارد (Srinivasarao et al., 2007). Sadri و همکاران (۲۰۱۶)، ارتباط شکل‌های مختلف پتاسیم با کانی‌های رسی در استان فارس را بررسی کردند و گزارش دادند که غالب کانی‌ها شامل اسمکتیت‌ها، ایلیت، پالی‌گورسیت و کلریت‌ها بودند و حضور اسمکتیت‌ها و ایلیت باعث افزایش پتاسیم قابل دسترس می‌شود. در مطالعه آن‌ها، دامنه تغییرات مقدار پتاسیم تبادلی، غیرتبادلی و

توسط گیاهان زراعی دارد؛ بنابراین، مطالعه حاضر با هدف بررسی اشکال مختلف پتاسیم و سرعت رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی در خاک‌های دشت دامنه‌ای شهرکرد، در ارتباط با کانی‌شناسی رس و سایر ویژگی‌های خاک انجام شد.

### مواد و روش‌ها

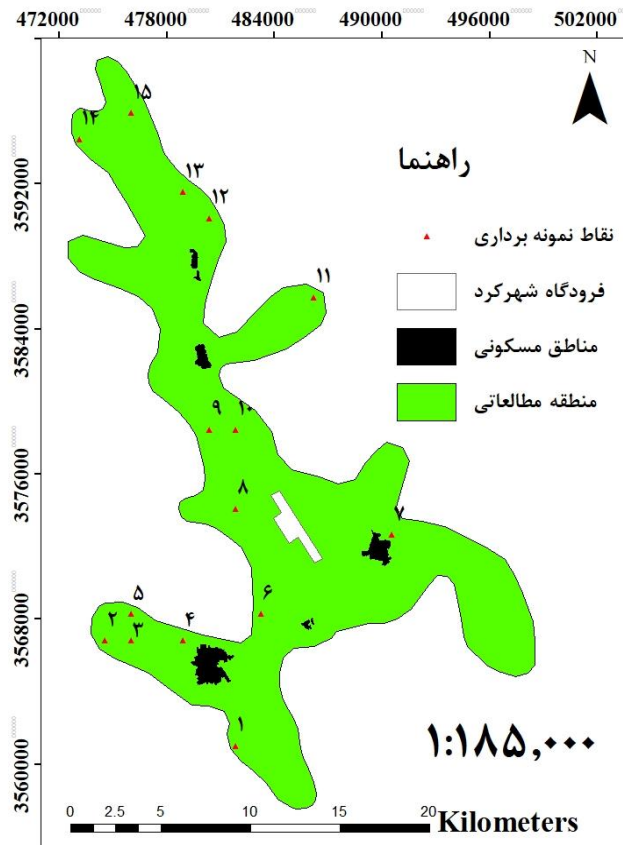
دشت شهرکرد با کاربری زراعی و وسعت ۲۱۴۰۰ هکتار، تحت کشت آبی گندم، یونجه، سیب‌زمینی و ذرت است. به استناد آمار ایستگاه هواشناسی سینوپتیک شهرکرد، میانگین دما در گرم‌ترین ماه سال (تیر ماه)، ۲۴/۶ درجه سلسیوس و در سردترین ماه سال (دی ماه) بین ۰ تا ۴- درجه سلسیوس و متوسط بارش سالانه در این منطقه ۳۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر است. رژیم حرارتی خاک منطقه مزیک و رژیم رطوبتی آن زیریک است. خاک غالب منطقه بر اساس گزارشات موجود در زیرگروه Typic calcixerepts قرار می‌گیرد.

به منظور مطالعه دینامیک پتاسیم خاک و ارتباط آن با کانی‌های رسی، ۱۲۰ نمونه خاک زراعی از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی متری در فروردین‌ماه ۱۴۰۳ خاک‌های دشت دامنه‌ای شهرکرد جمع‌آوری شد. پس از هوا خشک کردن نمونه‌ها و عبور از الک ۲ میلی‌متری، در این نمونه‌های اولیه درصد رس، پتاسیم تبادلی، پتاسیم غیرتبادلی و ظرفیت تبادل کاتیونی با ۳ تکرار تعیین و بر اساس تنوع این ویژگی‌ها، ۱۵ نمونه خاک که حاوی مقادیر مختلف پتاسیم بودند، انتخاب شد (شکل ۱). سپس ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های انتخاب‌شده، شامل؛ توزیع اندازه ذرات به روش هیدرومتری (Gee and Bauder, 1986)، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره ۲ به ۱ آب به خاک (Rhoades, 1996)، pH در سوسپانسیون ۲ به ۱ آب به خاک (Thomas, 1982)، کربن آلی به روش اکسیداسیون تر (Nelson and Sommers, 1996)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی با اسید (Loeppert and Suarez, 1996) و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک به روش استات سدیم در pH=7 (Sumner and Miller, 1996)، اندازه‌گیری شد. همچنین، پتاسیم تبادلی خاک‌ها به روش استات آمونیوم یک نرمال (Knudsen et al., 1982) و پتاسیم غیرتبادلی خاک‌ها به روش اسید نیتریک مولار و جوشان (Al-Kanani et al., 1984) استخراج و با دستگاه فلیم‌فتومتر اندازه‌گیری شد (مدل کورنینگ ۴۱۰).

کل در خاک‌ها به ترتیب؛ ۴۳۶-۲۳۰، ۱۲۳۵-۲۸۲ و ۹۲۰۱-۲۳۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک گزارش شده است. Najafi-Ghiri و همکاران (۲۰۱۹)، نشان دادند که در خاک‌های آهکی استان کهگیلویه و بویراحمد؛ ایلیت، اسمکتیت‌ها، کلریت‌ها، پالی‌گورسیت و مقادیر کمی ورمیکولیت، کائولینیت و کوآرتز یافت می‌شود؛ در مناطق مرطوب‌تر اسمکتیت‌ها و ایلیت و در مناطق خشک‌تر پالی‌گورسیت غالب بود. مقادیر پتاسیم محلول، تبادلی، غیرتبادلی و ساختمانی در خاک‌های مورد مطالعه، به ترتیب؛ ۱۲/۱-۱/۲، ۵۲۱-۱۱۱، ۱۷۰۵-۱۵۳ و ۱۰۳۷۹-۴۵۸۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر بود. آن‌ها گزارش کردند که شکل‌های پتاسیم با مقدار رس و ظرفیت تبادل کاتیونی همبستگی مثبت و معنی‌داری و با کربنات کلسیم همبستگی منفی و معنی‌داری دارد؛ پتاسیم تبادلی با اسمکتیت و پتاسیم غیرتبادلی با ایلیت مرتبط بود و مقدار پتاسیم ساختمانی و کل در خاک‌های دارای اسمکتیت و ایلیت به‌طور معنی‌داری بالاتر از سایر خاک‌ها بود.

در دشت‌های دامنه‌ای، به دلیل پایداری ژئومورفولوژیکی، تغییرات رس و تحول کانی‌های رسی رخ می‌دهد که منجر به تجمع کانی‌هایی مانند ایلیت و اسمکتیت‌ها می‌شود. این کانی‌ها دارای مقادیر متفاوتی پتاسیم هستند، بنابراین مقدار و نوع پتاسیم در این خاک‌ها به تنوع کانی‌های رسی موجود بستگی دارد. همچنین، تفاوت در ریزاقلیم‌ها در دشت دامنه‌ای، تأثیر معنی‌داری بر توزیع اشکال پتاسیم (محلول، تبادلی و غیرتبادلی) دارد. علمداری و همکاران (Alamdari et al., 2015)، با مطالعه ارتباط بین نوع کانی‌های رسی و شکل‌های مختلف پتاسیم، بیان کردند که در واحد فیزیوگرافی دشت دامنه‌ای که کانی ایلیت و اسمکتیت‌های بیشتری دارد، همه شکل‌های پتاسیم نسبت به اراضی پست و دشت رسوبی رودخانه‌ای دارای مقادیر بالاتری هستند.

بررسی نوع کانی‌شناسی رس در خاک‌ها، اشکال مختلف پتاسیم و سرعت رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی، برای درک بهتر ارتباط میان کانی‌ها و فرآیندهای تثبیت و آزادسازی پتاسیم و مدیریت کوددهی ضروری است. تبدیل شکل‌های مختلف پتاسیم به یکدیگر، جزئی از دینامیک و پویایی پتاسیم در خاک است؛ به طوری که با گذشت زمان بخشی از پتاسیم غیرتبادلی و ساختمانی می‌تواند به پتاسیم محلول و تبادلی تبدیل شود و بالعکس. بررسی وضعیت اشکال مختلف پتاسیم و سرعت رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی و ارتباط آن‌ها با کانی‌شناسی خاک، اهمیت زیادی در تعیین ذخایر پتاسیم، پیش‌بینی چرخه آن و جذب



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی نقاط نمونه‌برداری خاک مورد مطالعه مناطق زراعی دشت شهرکرد

Figure 1. Geographical location of the soil sampling points in the agricultural areas of the Shahrekord plain

۱۵۱۲، ۱۶۸۰، ۱۸۴۸ و ۲۰۱۷ ساعت پس از اضافه‌کردن کلسیم کلرید، عصاره‌گیری شدند. سپس، سوسپانسیون با دستگاه سانتریفیوژ با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه صاف، محلول رویی جدا و پتاسیم موجود در محلول عصاره‌گیری شده با استفاده از دستگاه فلیم‌فوتومتر (مدل کورننگ ۴۱۰) اندازه‌گیری شد. سپس ۲۰ میلی لیتر محلول کلسیم کلرید ۰/۰۱ مولار به نمونه‌ها اضافه شد و پس از ۳۰ دقیقه تکان‌دادن توسط دستگاه تکان‌دهنده برقی، نمونه‌ها به انکوباتور منتقل گردید (Hosseinpour, 2004).

کانی‌شناسی بخش رس با روش Hope و Kittrick (۱۹۶۳)، انجام گردید. بدین منظور کربنات کلسیم، ماده آلی و اکسیدهای آهن و آلومینیوم از نمونه‌ها حذف گردید. حذف کربنات کلسیم با استفاده از بافر استات سدیم نرمال با  $pH=5$ ، حذف ماده آلی با آب اکسیژنه و حذف اکسیدهای آهن و آلومینیوم با استفاده از بافر سدیم سترات با  $pH=7/3$  و سدیم دی‌تیونات روی حمام بن‌ماری در دمای ۸۰ درجه سلسیوس انجام شد. سپس، برای پراکنده شدن ذرات از بی‌کربنات سدیم ۲ درصد استفاده گردید. برای جداسازی بخش رس، نمونه‌ها به سیلندر منتقل و بعد از گذشت ۷ ساعت و ۴۵ دقیقه، بخش رس نمونه‌ها با استفاده از

قبل از شروع آزمایش‌های سینتیکی برای خارج کردن پتاسیم تبدلی و محلول، خاک‌ها با کلسیم کلرید ۱ مولار اشباع شدند، برای انجام این کار نمونه‌های خاک با کلسیم کلرید ۱ مولار (با نسبت ۵ به ۱) به مدت ۳۰ دقیقه با دستگاه تکان‌دهنده برقی تکان داده شدند، سپس نمونه‌ها سانتریفیوژ شده و محلول زلال رویی دور ریخته شد. این عمل سه بار تکرار گردید. کلرید اضافی باقی‌مانده ابتدا با آب مقطر و سپس با الکل تا کاهش قابلیت هدایت الکتریکی به ۴۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر شست‌وشو شد (Martin and Sparks, 1983).

برای بررسی سرعت آزاد شدن پتاسیم غیرتبدلی از روش عصاره‌گیری متوالی استفاده شد. بدین منظور به ۲ گرم از نمونه خاک‌های اشباع‌شده با کلسیم، ۲۰ میلی‌لیتر محلول کلسیم کلرید ۰/۰۱ مولار اضافه و نمونه‌ها به وسیله تکان‌دهنده برقی به مدت ۳۰ دقیقه تکان داده شدند. نمونه‌ها در دستگاه انکوباتور در دمای  $25 \pm 1$  درجه‌سانتی‌گراد قرار داده شد و قبل از پایان هر دوره، نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه به وسیله دستگاه تکان‌دهنده برقی تکان داده شدند. نمونه‌ها در زمان‌های ۲، ۴، ۸، ۲۴، ۴۸، ۷۲، ۹۶، ۱۲۰، ۱۴۴، ۱۶۸، ۳۳۶، ۵۰۴، ۶۷۲، ۸۴۰، ۱۰۰۸، ۱۱۷۶، ۱۳۴۴،

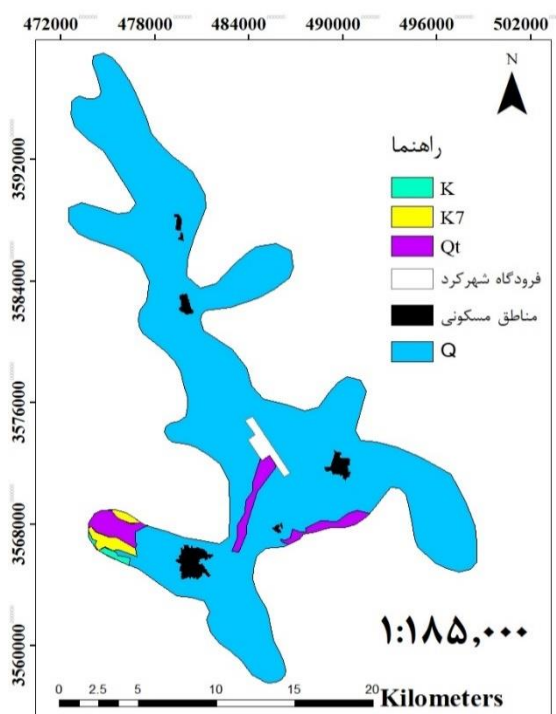
پتاسیم و تیمار پتاسیم با حرارت ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد یکسان باشد، این موضوع نشان‌دهنده عدم وجود کانی ورمی‌کولایت در خاک است (Dixon and Weed, 1992).

جهت بررسی ارتباط بین شکل‌های پتاسیم و مقدار آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی پس از ۲۰۱۷ ساعت، با ویژگی‌های خاک از ضریب همبستگی پیرسون با استفاده از نرم‌افزار Statistica 8 بهره‌برداری شد.

نقشه زمین‌شناسی منطقه مطالعاتی بر اساس رقومی سازی مرزهای نقشه زمین‌شناسی پایه با مقیاس (۱:۱۰۰۰۰۰) و جدول راهنمای آن به ترتیب در شکل ۲ آورده شده است. براین اساس، خاک‌های این منطقه به‌طور عمده بر روی رسوبات رسی و سیلتی مربوط به دوران چهارم زمین‌شناسی (دوره‌ی کواترنری) تشکیل شده‌اند. از لحاظ واحد فیزیوگرافی، در دشت دامنه‌ای شهرکرد، خاک‌ها در اثر انتقال و ته‌نشست مواد دانه ریز انتقالی از ارتفاعات در قسمت‌های نسبتاً مسطح تشکیل شده که شیب آن‌ها، از ۵-۸ درصد تجاوز نموده و پستی و بلندی در آن‌ها کم تا نسبتاً کم می‌باشند.

سیفون از سایر اجزاء جدا گردید. نمونه‌های رس توسط پتاسیم و منیزیم اشباع شدند و به‌منظور تشخیص نوع کانی‌ها، تیمارهای منیزیم، منیزیم-اتیلن گلیکول، منیزیم-گلیسرول، پتاسیم و پتاسیم با حرارت ۱۱۰، ۳۵۰ و ۵۵۰ درجه سلسیوس، توسط دستگاه پراش اشعه ایکس مدل D8 ADVANCE با ولتاژ ۴۰ کیلو وات و شدت جریان ۳۰ میلی‌آمپر، مورد تجزیه قرار گرفت. نمونه‌های اشباع با کلرید منیزیم تحت زاویه ۲θ، ۴-۴۰ و سایر تیمارها در زاویه ۲θ، ۴-۱۵ مطالعه شدند.

پس از تهیه و اشباع نمونه‌های رس با پتاسیم و منیزیم، به‌منظور تمایز اسمکتیت‌ها و ورمی‌کولایت‌ها از کلریت‌ها، نمونه‌ها تحت تیمارهای تکمیلی قرار گرفتند. ابتدا نمونه‌ها پس از تیمار منیزیم، با گلیسرول تیمار شدند. در صورت وجود اسمکتیت‌ها، بخشی از پیک ۱۴ آنگستروم به ۱۷-۱۸ آنگستروم تغییر می‌یابد و پهنای آن افزایش می‌یابد، در حالی که پیک مربوط به کلریت‌ها بدون تغییر باقی می‌ماند. کاهش شدت پیک ۱۴ آنگستروم در تیمار منیزیم اشباع با اتیلن گلیکول نسبت به تیمار منیزیم نیز نشان‌دهنده حضور اسمکتیت‌ها در خاک است. همچنین، در صورتی که نقطه فراز پیک ۱۰ آنگستروم در تیمار



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی دشت شهرکرد (مبنای این نقشه، نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ استان است).

Q: رسوبات سیلابی و تراس‌های جوان (ترکیبی از رس، سیلت و شن درشت)، Qt: رسوبات مخروط افکنه، K: آهک اوربیلین‌دار در بخش پایین به‌طور محلی دارای رسوبات تیبخیری، K7: آهک مارنی فسیل‌دار و لایه‌های نازک آهک رسی ماسه‌ای.

Figure 2. Geological map of the Shahrekord plain (based on the 1:100,000-scale geological map of the province).

Q: Floodplain deposits and young terraces (a mixture of clay, silt, and coarse sand), Qt: Alluvial fan deposits

K: Orbitolina-bearing limestone in the lower part, locally containing evaporitic deposits

K7: Fossiliferous marly limestone and thin layers of sandy clayey limestone.

نتایج و بحث

مواد آلی ۱/۵۲-۰/۲۳ درصد، کربنات کلسیم معادل ۴۶/۰-۲۴/۰ درصد، ظرفیت تبادل کاتیونی ۲۳/۷-۱۳/۳ سانتی‌مول‌بار بر کیلوگرم و بافت خاک‌ها سبک تا سنگین بودند.

نتایج برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، خاک‌ها دارای pH ۸/۲-۷/۷،

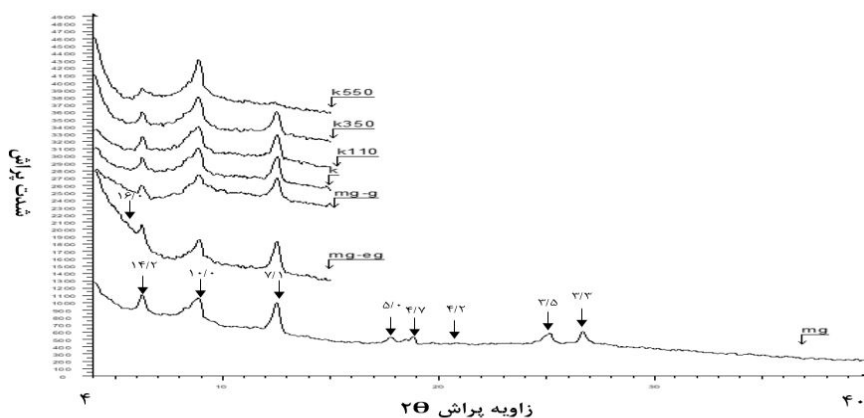
جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی در خاک‌های مطالعه شده  
Table 1. Some physical and chemical properties of the studied soils

ظرفیت تبادل کاتیونی	کربنات کلسیم معادل	ماده آلی	سیلت	رس	EC <sub>1:2</sub>	pH <sub>1:2</sub>	شماره نمونه
CEC	ECC	OM	Silt	Clay			Sample No.
سانتی‌مول‌بار بر کیلوگرم خاک Cmol <sup>+</sup> .kg <sup>-1</sup>		درصد %			دسی‌زیمنس بر متر dS.m <sup>-1</sup>		
13.3	24.0	0.68	26.0	17.4	0.40	7.8	1
20.0	33.5	0.23	16.0	17.4	0.31	7.9	2
18.0	43.0	0.82	20.0	17.4	0.37	7.8	3
22.0	46.0	1.28	22.0	17.4	0.38	8.1	4
23.7	38.2	0.51	28.0	41.4	0.31	8.0	5
21.0	29.3	0.98	34.0	43.4	0.35	8.0	6
16.8	27.8	0.68	20.0	17.4	0.35	8.1	7
21.2	33.2	1.52	34.0	19.4	0.39	8.0	8
19.7	28.3	0.87	24.0	33.4	0.32	8.0	9
21.2	36.2	0.72	28.0	47.4	0.33	8.0	10
21.4	29.0	0.62	18.0	17.4	0.31	7.9	11
21.3	24.5	0.87	14.0	19.4	0.34	7.7	12
22.1	24.5	1.02	16.0	17.4	0.33	8.0	13
18.2	34.2	0.40	38.0	35.4	0.31	8.1	14
21.4	30.0	0.65	32.0	41.4	0.32	8.1	15
20.0	32.1	0.79	25.0	27.0	0.34	8.0	میانگین (average)

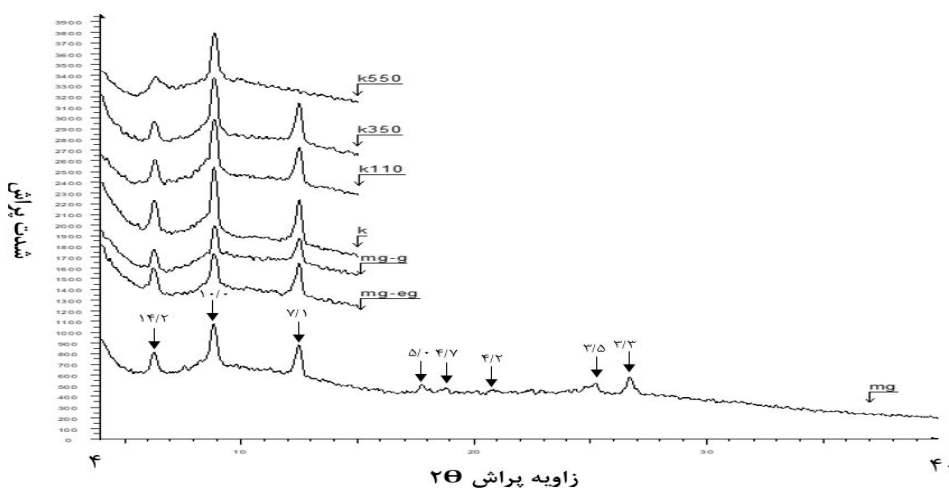
معمولاً نشان‌دهنده وجود شرایط اقلیمی گرم و مرطوب در گذشته منطقه می‌باشد (Khormali and Abtahi, 2003). منشأ کانی کلریت‌ها می‌تواند مربوط به مواد مادری غنی از کلریت و رسوبات اولیه در خاک باشد. در دشت دامنه‌ای شهرکرد که زمین‌شناسی غالب آن را رسوبات سیلابی و تراس‌های جوان تشکیل می‌دهد، احتمالاً وجود کلریت‌ها، بیشتر ناشی از منشأ مواد مادری و رسوبات اولیه در خاک است (Salehi et al., 2003). همچنین، افزایش شدت پیک رده اول کلریت (۱۴ آنگستروم) در تیمار پتاسیم با دمای ۱۱۰ و ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد، نشان‌دهنده تری اکتاهدرال بودن این کانی است (Dixon and Weed, 1992). وجود کانی میکاها در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک، عمدتاً ناشی از منشأ مواد مادری می‌باشد.

شکل ۳ دیفرکتوگرام‌های مربوط به رس را در نمونه‌های ۱، ۶ و ۷ نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که کانی‌های غالب در نمونه‌های ۱ و ۷، شامل؛ میکاها، کلریت‌ها، کائولینیت، اسمکتیت‌ها، کوارتز و مقدار کمی کانی مخلوط میکاها- کلریت‌ها هستند. نوع کانی‌ها در همه نمونه‌های مورد مطالعه، یکسان بود، ولی از لحاظ مقدار تا حدی با هم تفاوت داشتند (سایر دیفرکتوگرام‌ها ارائه نشده است). دیفرکتوگرام‌های بخش رس نمونه خاک شماره ۶ نشان می‌دهد که کانی‌های غالب در این نمونه، شامل؛ میکاها، کلریت‌ها، کائولینیت، کوارتز و کانی مخلوط میکاها- کلریت‌ها هستند. تشکیل کانی کائولینیت نیازمند اقلیم گرم و مرطوب با زهکشی مناسب است؛ بنابراین، حضور این کانی در خاک‌ها

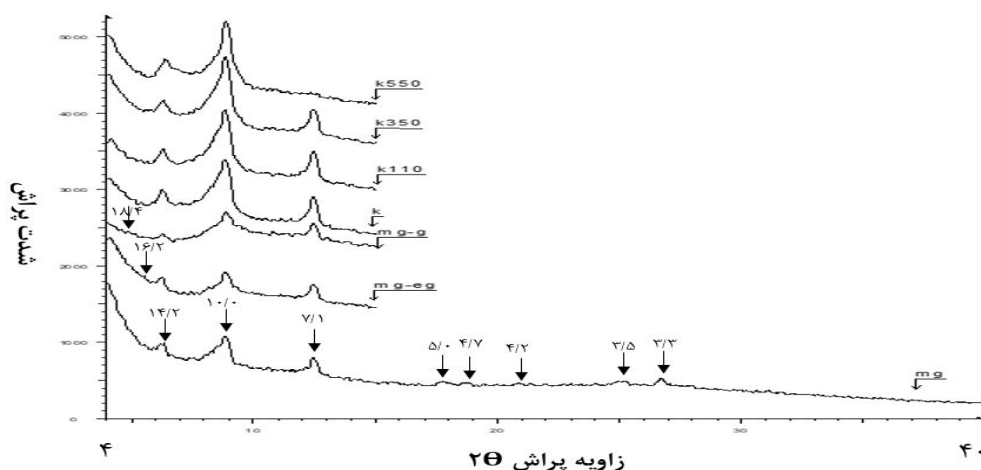
(الف)  
نمونه رس ۱



(ب)  
نمونه رس ۶



(ج)  
نمونه رس ۷



شکل ۳- دیفرکتوگرام رس مربوط به نمونه ۱ (الف)، ۶ (ب) و ۷ (ج). Mg: نمونه اشباع با منیزیم، Mg-eg: نمونه اشباع با اتیلن گلیکول، Mg-g: نمونه اشباع با گلیسرول، K: نمونه اشباع با پتاسیم، K110: نمونه اشباع با پتاسیم و حرارت ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد، K350: نمونه اشباع با پتاسیم و حرارت ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد، K550: نمونه اشباع با پتاسیم و حرارت ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد.

Figure 3. Clay diffractograms of samples 1 (a), 6 (b), and 7 (c). Mg: magnesium-saturated sample; Mg-eg: magnesium-saturated sample treated with ethylene glycol; Mg-g: magnesium-saturated sample treated with glycerol; K: potassium-saturated sample; K110: potassium-saturated sample heated at 110 °C; K350: potassium-saturated sample heated at 350 °C; K550: potassium-saturated sample heated at 550 °C.

سپس کند شده و با سرعت نسبتاً ثابتی تا پایان ۲۰۱۷ ساعت ادامه یافته است. مشابه این روند نیز توسط سایر محققین گزارش شده است (Zareian et al., 2018). آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی با سرعت بالا پس از ۱۶۸ ساعت را می‌توان به علت آزاد شدن پتاسیم از مناطق لبه‌ای و گوه‌ای شکل کانی‌ها با انرژی جذب کم دانست. در ادامه با افزایش فاصله پتاسیم از لبه کانی‌ها و افزایش فاصله پخشیدگی، پتاسیم‌های بین لایه‌ای در ساختمان کانی آزاد می‌شوند که رهاسازی با سرعت کمتری صورت می‌گیرد. تفاوت در مقدار پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده می‌تواند به علت نوع و اندازه کانی‌های پتاسیم‌دار و شرایط محیطی باشد (Han et al., 2024). همچنین، ویژگی‌های کانی‌های پتاسیم‌دار شامل؛ منشأ بار لایه‌ای، ساختمان بلور و ترکیب شیمیایی کانی، جهت‌گیری هیدروکسیل ساختمانی، تغییر بار لایه‌ای و درجه تخلیه کانی از پتاسیم، نقش مهمی در آزاد کردن پتاسیم غیرتبادلی دارند (Gurav et al., 2024).

نتایج مقادیر شکل‌های مختلف پتاسیم و مقدار آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی در جدول ۲، نشان داده شده است. دامنه تغییرات مقدار پتاسیم محلول، تبادلی و غیرتبادلی به ترتیب؛ ۹۹/۷-۱۱/۵، ۶۱۲/۷-۱۰۸/۵ و ۴۹۱-۲۰۶۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر بود. دامنه تغییرات مقدار تجمعی پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده پس از ۲۰۱۷ ساعت، ۴۷۹/۰-۲۲۵/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر بود. کمترین مقدار پتاسیم محلول، تبادلی، غیرتبادلی و مقدار تجمعی پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده پس از ۲۰۱۷ ساعت در خاک شماره ۱ می‌باشد. بیشترین مقدار پتاسیم محلول و غیرتبادلی در خاک شماره ۷، بیشترین پتاسیم تبادلی در خاک شماره ۱۲ و بیشترین مقدار تجمعی پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده پس از ۲۰۱۷ ساعت در خاک شماره ۱۱ بود.

مقدار تجمعی پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده با عصاره‌گیری متوالی با کلسیم کلرید ۰/۰۱ مولار در خاک‌ها در شکل ۴، نشان داده شده است. نتایج نشان داد که در تمام خاک‌ها، سرعت آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی تا ۱۶۸ ساعت سریع بوده،

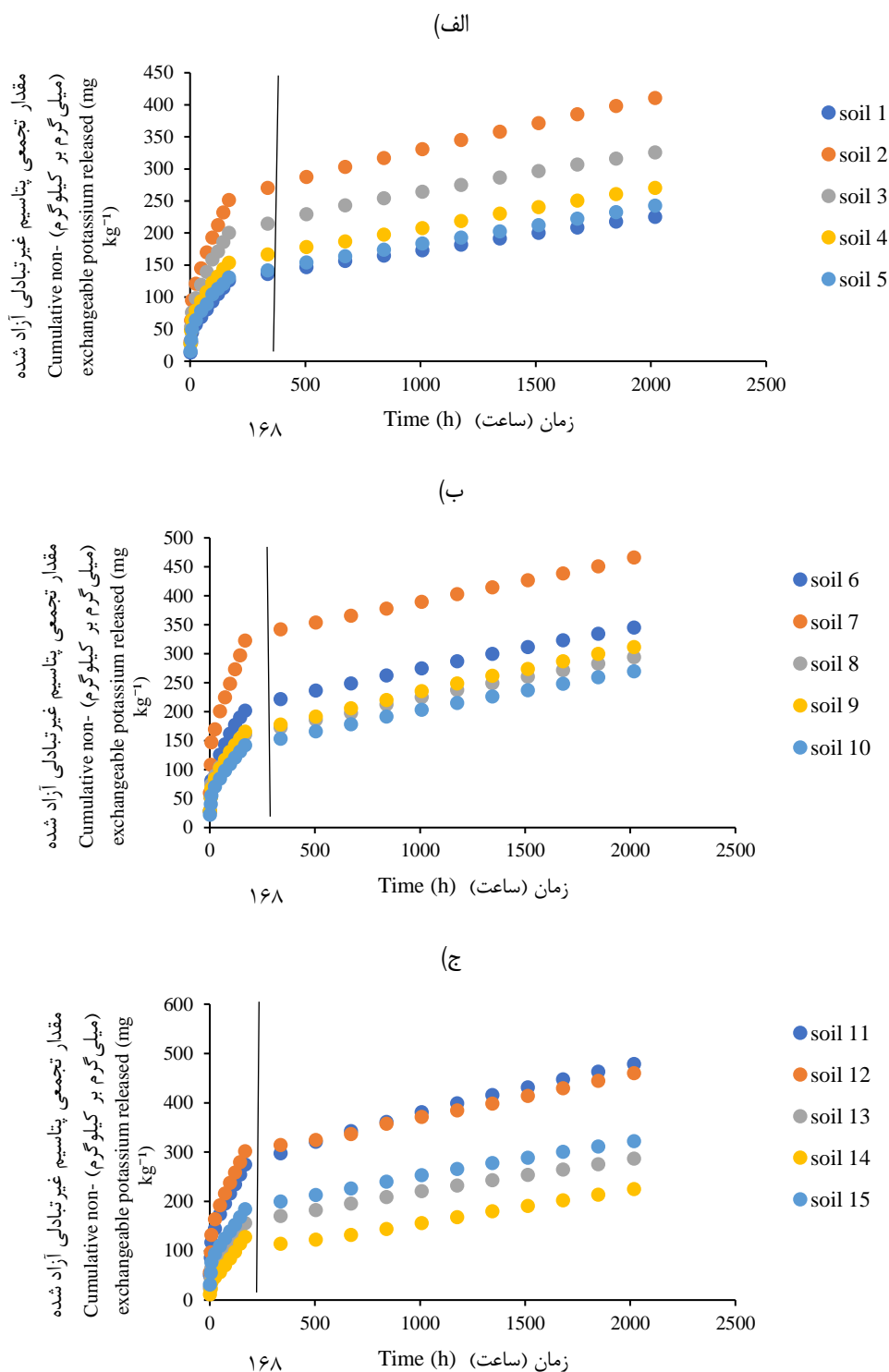
جدول ۲- مقادیر شکل‌های پتاسیم و مقدار پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده پس از ۱۶۸ و ۲۰۱۷ ساعت (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در خاک‌های مطالعه شده

Table 2. Amounts of potassium forms and the non-exchangeable potassium released after 168 and 2017 hours (mg kg<sup>-1</sup>) in the studied soils

مقدار تجمعی پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده پس از ۲۰۱۷ ساعت	مقدار تجمعی پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده پس از ۱۶۸ ساعت	پتاسیم غیرتبادلی	پتاسیم تبادلی	پتاسیم محلول	شماره نمونه
Cumulative release of non-exchangeable potassium after 2017 hours	Cumulative release of non-exchangeable potassium after 168 hours	Non-Exchangeable Potassium	Exchangeable Potassium	Soluble Potassium	Sample No.
میلی‌گرم بر کیلوگرم mg.kg <sup>-1</sup>					
225.0 (46)*	126.0	491	108.5	11.5	1
410.5 (34)	251.5	1212	355.3	22.7	2
325.5 (42)	200.0	778	225.3	16.7	3
270.5 (21)	153.5	1305	120.7	19.3	4
242.5 (46)	130.5	527	156.3	11.7	5
361.0 (36)	202.0	1007	307.3	30.7	6
466.5 (23)	323.0	2065	585.3	99.7	7
294.5 (36)	160.5	822	439.3	18.7	8
312.0 (45)	166.0	700	466.0	16.0	9
270.0 (32)	142.5	845	441.5	13.5	10
479.0 (37)	275.0	1291	595.3	53.7	11
460.5 (33)	302.0	1382	612.7	65.3	12
287.0 (28)	156.0	1028	462.5	29.5	13
226.5 (39)	128.0	575	413.3	12.7	14
322.5 (42)	184.5	775	498.7	16.3	15
330.2 (33)	191.5	986.9	385.9	29.2	میانگین

\*: پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده پس از ۲۰۱۷ ساعت به روش عصاره‌گیری متوالی

\*: Non-exchangeable potassium released after 2017 hours by the sequential extraction method



شکل ۴- مقدار پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده توسط عصاره‌گیر کلسیم کلرید ۰/۰۱ مولار در خاک‌های مطالعه شده (الف، ب و ج)  
 Figure 4. Amount of non-exchangeable potassium released by 0.01 M calcium chloride extractant in the studied soils

دارای مقدار پتاسیم غیرتبادلی بالایی (۲۰۶۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود، اما کمترین درصد آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی (۲۳ درصد) را نشان داد؛ این امر عمدتاً ناشی از نوع و فراوانی کانی‌های رسی است. در خاک شماره ۱، حضور اسمکتیت‌ها باعث آزادسازی

در نمونه خاک شماره ۱ و خاک شماره ۷، درصد رس یکسان و محتوای سیلت نیز تقریباً برابر بود. در نمونه ۱، با وجود کمترین مقدار پتاسیم تبادلی و غیرتبادلی، بیشترین آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی (۴۶ درصد) مشاهده شد. در مقابل، خاک شماره ۷،

اسمکتیت‌های با بار لایه‌ای زیاد، قابلیت انبساط کمتری دارند در حالی که اسمکتیت‌های دارای بار لایه‌ای کم، بیشتر منبسط شده و پیک‌های قوی بیشتر از ۱۷ آنگستروم دارند (Fanning et al., 1992).

دو شکل پتاسیم تبادلی و محلول، اشکال قابل دسترس پتاسیم برای گیاهان تلقی می‌شوند، با این وجود، مطالعات نشان داده است که دو شکل پتاسیم غیرتبادلی و ساختمانی می‌توانند در تغذیه گیاه موثر باشند (Wang et al., 2000). کشت طولانی مدت گیاهان با تقاضای بالای پتاسیم، در خاک‌هایی که کود پتاسه دریافت نکرده‌اند یا به میزان اندکی دریافت کرده‌اند، سبب رهاسازی پتاسیم از مکان‌های بین لایه‌ای و تخریب ساختار کانی می‌گردد و باعث افزایش فاصله بین لایه‌ای در کانی‌های رسی می‌شود. Barre و همکاران (۲۰۰۸)، گزارش نمودند که در اثر کشت مداوم و عدم مصرف کودهای پتاسه، مقدار کانی‌های میکا کاهش یافته و کانی‌های انبساط‌پذیر مانند اسمکتیت‌ها فراوانی بیشتری پیدا کردند. Murrell و همکاران (۲۰۲۱)، گزارش نمودند که کوددهی طولانی مدت با پتاسیم، محتوای پتاسیم تثبیت شده در کانی‌های میکایی و شبه میکایی خاک را افزایش می‌دهد، اگرچه این کانی‌ها ویژگی‌های کامل میکای اولیه را ندارند و نمی‌توان آن‌ها را به عنوان میکای اولیه طبقه‌بندی کرد. Ross و همکاران (۱۹۸۹) چنین مشاهداتی را پس از چهار سال کوددهی زیاد پتاسیم در خاک‌های منطقه نی‌آگارا در جنوب انتاریو گزارش نمودند و بیان کردند که با مصرف زیاد کود پتاسه، تثبیت پتاسیم در خاک افزایش یافت و ورمی‌کولایت خصوصیات ساختاری شبیه میکا پیدا کرد. Bhonsle و همکاران (۱۹۹۲)، گزارش نمودند که بالاترین مقدار پتاسیم تبادلی، در خاک‌هایی با رس غالب اسمکتیت وجود دارد.

با توجه به اینکه نوع و ترکیب کانی‌های رس بر رفتار آزادسازی پتاسیم و تثبیت آن در خاک تأثیر می‌گذارد، بررسی ارتباط بین اشکال مختلف پتاسیم و ویژگی‌های خاک می‌تواند درک بهتری از دسترسی پتاسیم برای گیاهان فراهم کند. جدول ۳، همبستگی شکل‌های پتاسیم و مقدار آزادسازی تجمعی پتاسیم غیرتبادلی پس از ۲۰۱۷ ساعت با ویژگی‌های خاک را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که غلظت پتاسیم محلول، غیرتبادلی و مقدار پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده پس از ۲۰۱۷ ساعت، با قابلیت هدایت الکتریکی همبستگی مثبت داشت (به ترتیب:  $r=0.54^{***}$ ،  $r=0.45^{**}$  و  $r=0.25^{**}$ )، پتاسیم محلول و غیرتبادلی با ظرفیت تبادل کاتیونی همبستگی منفی (به ترتیب:  $r=-0.18^*$  و  $r=-0.26^*$ )، پتاسیم محلول با ماده آلی همبستگی مثبت ( $r=0.21^*$ ) و پتاسیم تبادلی با کربنات کلسیم معادل همبستگی منفی ( $r=-0.34^{***}$ )

سریع‌تر پتاسیم غیرتبادلی شد، در حالی که در خاک شماره ۷، فراوانی میکاها و ظرفیت بالای آن‌ها برای تثبیت پتاسیم غیرتبادلی، موجب کاهش درصد آزادسازی پتاسیم شد. Srinivasarao و همکاران (۲۰۰۶)، گزارش نمودند که مقدار پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده در خاک‌های اسمکتیتی ۳۵۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم و در خاک‌های ایلیتی، ۱۵۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک بود. سرعت آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی در خاک‌های اسمکتیتی بیشتر است، در حالی که در خاک‌های ایلیتی، مقدار پتاسیم تبادلی سطح رس کم و مقدار پتاسیم غیرتبادلی بیشتر است.

در خاک‌هایی که مصرف کودهای پتاسه زیاد است، کانی‌های ورمی‌کولایت و اسمکتیت می‌توانند تحت تأثیر پتاسیم اضافی و فرآیندهای تبادل به کانی‌هایی با رفتار مشابه میکا تبدیل شوند (Ross et al., 1989). علاوه بر این، شست‌وشوی زیاد، شرایط را برای آزادسازی پتاسیم از میکاها فراهم کرده و باعث هوادیدگی آن به سایر کانی‌های سیلیکاته ۲:۱ می‌شود (Dixon and Weed, 1992).

Simonsson و همکاران (۲۰۰۹)، گزارش نمودند که مدیریت بلندمدت پتاسیم، چه از طریق کوددهی و چه برداشت مستمر، بر ظرفیت تثبیت پتاسیم در خاک تأثیر می‌گذارد و این تغییرات با تغییر شدت پیک میکا (پیک ۱۰ آنگستروم) قابل مشاهده است. در شرایط کوددهی زیاد پتاسیم، یون‌های پتاسیم وارد فضای بین‌لایه‌ای ایلیت می‌شوند و تثبیت پتاسیم موجب افزایش شدت پیک ۱۰ آنگستروم در نمونه‌های تیمار شده با پتاسیم می‌شود. بر این اساس، در دیفرکتوگرام‌های مطالعه شده، افزایش شدت پیک ۱۰ آنگستروم در تیمار پتاسیم نشان دهنده کاربرد طولانی مدت کود پتاسه و تثبیت پتاسیم در این خاک‌هاست. وجود پیک‌های حد واسط، پله‌ای و شانه‌ای، بیانگر حضور کانی‌های مخلوط و حد واسط بوده و نشان‌دهنده‌ی تداوم فرآیند هوادیدگی در خاک‌های مورد مطالعه است. وجود کانی‌های مخلوط میکاها-کلریت‌ها، ممکن است به دلیل هوادیدگی کلریت‌ها و خارج شدن لایه‌های هیدروکسی بین لایه‌ای و تغییر بار و تبدیل آن به کانی‌های دیگر باشد. کانی اسمکتیت‌ها در همه نمونه‌ها به جز خاک شماره ۶ وجود دارد. این کانی در خاک‌ها، دارای سه منشأ می‌باشد؛ منشأ تخریبی یا توارثی، تبدیل سایر کانی‌ها به اسمکتیت‌ها و نوتشکیلی از محلول خاک. در حالت نوتشکیلی، به دلیل افزایش غلظت عناصر و چرخه‌های متناوب خشک و تر شدن خاک ناشی از آبیاری زمین‌های زراعی، شرایط برای تشکیل اسمکتیت‌ها فراهم می‌شود. منشأ اسمکتیت‌ها در خاک‌های مورد مطالعه، عمدتاً شامل تبدیل سایر کانی‌ها و نوتشکیلی از محلول خاک است. همچنین، در بیشتر نمونه‌های مطالعه شده، اسمکتیت دارای بار لایه‌ای متفاوت مشاهده شد.

اسمکتیت‌ها، پتاسیم غیرتبادلی بالایی دارد که عمدتاً ناشی از حضور بالای میکاها است و نشان می‌دهد که نسبت بالای میکاها می‌تواند ظرفیت آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی را کاهش دهد. این موضوع نشان می‌دهد که ترکیب کانی‌های رسی می‌تواند ظرفیت آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی را تحت تأثیر قرار دهد و صرفاً مقدار کل رس تعیین‌کننده آن نیست. در خاک شماره ۶ که کانی اسمکتیت‌ها مشاهده نشده است، میزان پتاسیم غیرتبادلی و تبادلی هنوز تحت تأثیر نسبت بالای میکاها قرار دارد. خاک‌هایی که دارای مقادیر بیشتری میکاها هستند، ممکن است آزادسازی آرام‌تر پتاسیم غیرتبادلی را نشان دهند؛ بنابراین، میزان نسبی کانی‌ها در خاک و نه صرفاً مقدار کل رس، عامل تعیین‌کننده رفتار پتاسیم در خاک‌های مطالعه شده است.

( $r=$ ) داشت. اشکال پتاسیم با سایر ویژگی‌ها از جمله مقدار رس، همبستگی ندارد.

عدم وجود همبستگی بین اشکال پتاسیم و مقدار رس نشان می‌دهد که میزان پتاسیم بیش از آنکه تحت تأثیر درصد کل رس باشد، تحت تأثیر نوع و ترکیب کانی‌های رس قرار دارد. با وجود اینکه نوع کانی‌های رس در همه نمونه‌ها مشابه است و شامل میکاها، کلریت‌ها، کائولینیت، اسمکتیت‌ها، کوارتز و مقادیری از کانی مخلوط میکاها-کلریت‌ها می‌باشد، تفاوت در مقادیر نسبی این کانی‌ها می‌تواند رفتار آزادسازی و تثبیت پتاسیم را تحت تأثیر قرار دهد. به همین دلیل، همبستگی مستقیمی بین اشکال مختلف پتاسیم و مقدار کل رس مشاهده نمی‌شود. برای مثال، خاک شماره ۱ با مقدار رس و سیلت مشابه خاک شماره ۷، پتاسیم غیرتبادلی کمتری دارد، اما سرعت آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی در آن بیشتر است، همچنین، همان‌طور که دیفرکتوگرام رس نمونه ۷ نشان می‌دهد، این نمونه با کمترین مقدار

جدول ۳- همبستگی شکل‌های پتاسیم با ویژگی‌های خاک

Table 3. Correlation of potassium forms with soil properties

کربنات کلسیم معادل	ماده آلی	CEC	شن	سیلت	رس	EC	pH	فرم‌های پتاسیم Forms of potassium
-0.01 <sup>ns</sup>	0.21*	-0.18*	-0.02 <sup>ns</sup>	0.11 <sup>ns</sup>	-0.08 <sup>ns</sup>	0.54**	0.16 <sup>ns</sup>	پتاسیم محلول Soluble potassium
-0.34**	-0.04 <sup>ns</sup>	0.13 <sup>ns</sup>	0.0004 <sup>ns</sup>	-0.16 <sup>ns</sup>	0.16 <sup>ns</sup>	0.005 <sup>ns</sup>	0.06 <sup>ns</sup>	پتاسیم تبادلی Exchangeable potassium
0.11 <sup>ns</sup>	-0.10 <sup>ns</sup>	-0.26*	0.07 <sup>ns</sup>	0.04 <sup>ns</sup>	-0.14 <sup>ns</sup>	0.45**	0.11 <sup>ns</sup>	پتاسیم غیرتبادلی Non-exchangeable potassium
-0.15 <sup>ns</sup>	0.07 <sup>ns</sup>	-0.12 <sup>ns</sup>	0.001 <sup>ns</sup>	0.09 <sup>ns</sup>	-0.09 <sup>ns</sup>	0.25**	0.10 <sup>ns</sup>	مقدار پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده پس از ۲۰۱۷ ساعت Amount of non-exchangeable potassium released after 2017 hours

\*\* : معنی‌دار در سطح ۱ درصد، \* : معنی‌دار در سطح ۵ درصد و <sup>ns</sup> : غیر معنی‌دار

\*\* : significant at the 1% level, \* : significant at the 5% level, and ns: not significant

### نتیجه‌گیری

دشت شهرکرد عمدتاً تحت تأثیر نوع و ترکیب کانی‌های رسی قرار داشت، بر این اساس، پیشنهاد می‌شود که برنامه‌ریزی بهینه کوددهی پتاسیمی در این خاک‌ها، با در نظر گرفتن ترکیب کانی‌های رسی و وضعیت پتاسیم تبادلی و غیرتبادلی انجام شود تا نیاز گیاهان به طور مؤثر تأمین و از مصرف غیرضروری کود جلوگیری شود.

### تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

مطالعه حاضر نشان داد که مقادیر پتاسیم محلول، تبادلی، غیرتبادلی و پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده پس از ۲۰۱۷ ساعت، در خاک‌های مختلف، متفاوت بود. کانی‌های غالب در این خاک‌ها شامل میکاها، کلریت‌ها، کائولینیت، اسمکتیت‌ها، کوارتز و مقادیر اندکی کانی‌های مختلط میکا-کلریت بودند که از نظر سهم نسبی با یکدیگر متفاوت بودند. اسمکتیت‌ها با بار لایه‌ای متغیر و میکاها به‌عنوان منابع مهم پتاسیم تبادلی و غیرتبادلی در این خاک‌ها نقش داشتند. دینامیک پتاسیم در خاک‌های زراعی

## References

- Alamdari, p., Kamrani, V., and Mohammadi, M. H. 2015. Clay Mineralogy Relationships with Potassium Forms in Different Physiographic Units. *Water and Soil*, 29(6): 1578-1589. <https://doi.org/10.22067/jsw.v29i6.34905> (In Persian).
- Al-Kanani, T., Mackenzie, A. F., and Ross, G. J. 1984. Potassium status of some Quebec soils: K released by nitric acid and sodium tetraphenylboron as related to particle size and mineralogy. *Canadian Journal of Soil Science*, 64(1): 99-106.
- Barre, P., Montagnier, C., Chenu, C., Abbadie, L., and Velde, B. 2008. Clay minerals as a soil potassium reservoir: observation and quantification through X-ray diffraction. *Plant and Soil*, 302(1): 213-220. <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-007-9471-6>
- Bohn, H. L., McNeal, B. L., and Connor, A. O. 1985. *Soil Chemistry*. John Wiley and Sons, New York.
- Bertsch, P. M., and Thomas, G. W. 1985. Potassium status of temperate region soils. *Potassium in agriculture*, 129-162.
- Bhat, M. A., Tomar, D., Grewal, K. S., Sahoo, J., & Dar, E. A. (2023). Non-exchangeable potassium release and supplying power of soils of Haryana, Northwest India. *Journal of Plant Nutrition*, 46(17), 4140-4155. <https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2221683>
- Bhonsle, N. S., Pal, S. K. and Sekhon, G. S. 1992. Relationship of K forms and release characteristics with clay mineralogy. *Geoderma*. 54(1): 285-293. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(92\)90110-S](https://doi.org/10.1016/0016-7061(92)90110-S)
- Dixon, J. B., and Weed, S.B. 1992. *Minerals in soil environments*. 2nd ed. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, U.S.A. 1244p.
- Fanning, D. S., Keramidias, V. Z., and El-Desokey, M. A. 1992. Micas. PP. 552-634. In: Dixon, J. B, Weed, S. B. (Eds.) *Minerals in Soil Environments*, Soil Science Society of America Book Ser 1. Soil Science Society of America, Madison, WI.
- Gunal, H. and Ransom, M. D. 2006. Genesis and micromorphology of loess-derived soils from central Kansas. *Catena*, 65(3): 222-236. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2005.11.018>
- Gee, G. W., and Bauder, J. W. 1986. Particle-size analysis. In: Klute A. (ed.) *Methods of Soil Analysis: Part I-Physical and mineralogy methods*. Agron. Monogr. 9. 2nd ed. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin. pp. 383-412.
- Gurav, P. P., Ray, S. K., Datta, S. C., Choudhari, P. L., & Hartmann, C. 2024. Role of clay cation exchange capacity, location of charge, and clay mineralogy on potassium availability in Indian Vertisols. *Clays and Clay Minerals*, 72, e3. <https://doi.org/10.1017/cmn.2024.6>
- Hosseinpur, A. R. 2004. Evaluation of Several Extractants for Determining Available Potassium Garlic in some Soils of Hamedan. *Journal of Water and Soil Science*. 8(2), 45-57. <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-424-fa.html>. (In Persian).
- Han, G. Z., Fan, H. Z., Han, B. S., Huang, L. M., Cao, X. M., & Yang, F. (2024). Paddy management controls potassium release from minerals in purple soils after 40 years of cultivation. *European Journal of Soil Science*, 75(3), e13492. <https://doi.org/10.1111/ejss.13492>
- Jalali, M. 2005. Release kinetics of nonexchangeable potassium in calcareous soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36(13-14):1903-1917. <https://doi.org/10.1081/CSS-200062490>
- Jini, D., Ganga, V. S., Greeshma, M. B., Sivashankar, R., and Thirunavukkarasu, A. 2024. Sustainable agricultural practices using potassium-solubilizing microorganisms (KSMs) in coastal regions: a critical review on the challenges and opportunities. *Environment*,

- Development and Sustainability, 26(6), 13641-13664.
17. Kittrick, J. A., and Hope, E. W. 1963. A procedure for the particle-size separation of soils for X-ray diffraction analysis. *Soil Science*, 96(5): 319-325.
  18. Knudsen, D., Peterson, G. A., and Pratt, P. F. 1982. Lithium, Sodium and Potassium. *Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties*. (2nd ed.). American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin. pp. 225-246.
  19. Khormali, F., and Abtahi, A. 2003. Origin and distribution of clay minerals in calcareous arid and semi-arid soils of Fars Province, southern Iran. *Clay minerals*, 38(4): 511-527. <http://dx.doi.org/10.1180/0009855023740112>
  20. Kaur, H. 2019. Forms of potassium in soil and their relationship with soil properties: A review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(10): 15801586. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.810.184>
  21. Loeppert, R. H., and Suarez, D. L. 1996. Carbonate and gypsum In: Sparks D.L. (ed.) *Chemical Methods of Soil Analysis*. Soil Science Society of America Madison pp. 437-447.
  22. Martin, H. W., & Sparks, D. L. 1983. Kinetics of nonexchangeable potassium release from two coastal plain soils. *Soil Science Society of America Journal*, 47(5): 883-887.
  23. Mustscher, H. 1995. Measurement and assessment of soil potassium. *International potash institute Research Topics Number 4*''.
  24. Mouhamad, R., Alsaede, A., and Iqbal, M. 2016. Behavior of potassium in soil: a mini review. *Chemistry International*, 2(1): 58-69.
  25. Murrell, T. S., Mikkelsen, R. L., Sulewski, G., Norton, R., and Thompson, M. L. 2021. Improving potassium recommendations for agricultural crops (p. 455). Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-59197-7>
  26. Nelson, D. W., and Sommers, L. E. 1996. Carbon, organic carbon, and organic matter. In: Sparks D.L. (ed) *Methods of Soil Analysis*. Soil Science Society of America, Madison. pp. 961-1010.
  27. Najafi-Ghiri, M., Owliaie, H. R., and Boostanic, H. R. 2019. Factors affecting potassium pools distribution in some calcareous soils of Kohgilouye and Boyerahmad province. *Applied Soil Research*, 7(2), 196-207. (In Persian).
  28. Prajapati, K., and Modi, H. A. 2012. The importance of potassium in plant growth—a review. *Indian journal of plant sciences*, 1(02-03): 177-186.
  29. Rhoades, J. D. 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. In: Sparks, D.L., (Eds.), *Methods of soil analysis, Part 3- Chemical Methods*. Agronomy Monograph, vol. 9. American Society Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, pp 417-435.
  30. Ross, G. J., Gamble, D. S., and Cline, R. A. 1989. Potassium exchange and fixation in some southern Ontario soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 69(3): 649-661
  31. Srinivasarao, C., Rupa, T. R., Subba Rao, A., Ramesh, G., & Bansal, S. K. (2006). Release kinetics of nonexchangeable potassium by different extractants from soils of varying mineralogy and depth. *Communications in soil science and plant analysis*, 37(3-4), 473-491. <https://doi.org/10.1080/00103620500449351>
  32. Srinivasarao, C., R. N. Singh, A. N. Ganeshamurthy, G. Singh and A. Masood. 2007. Fixation and recovery of added phosphorus and potassium in different soil types of pulse growing regions of India. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 38: 449-460. <http://dx.doi.org/10.1080/00103620601174080>
  33. Sumner, M. E., and Miller, W. P. 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficients. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*, 5: 1201-1229.
  34. Sparks, D. L. 1987. Potassium dynamics in soils. In *Advances in soil*

- science (pp. 1-63). New York, NY: Springer New York.
35. Simonsson, M., Hillier, S., and Oborn, I. 2009. Changes in clay minerals and potassium fixation capacity as a result of release and fixation of potassium in long-term field experiments. *Geoderma*, 151(3-4), 109-120. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.03.018>
  36. Sadri, N., Owliaie, H. R., Adhami, E., and Najafi Ghiri, M. 2016. Investigation of Different Forms of Potassium as a Function of Clay Mineralogy and Soil Evolution in Some Soils of Fars Province. *Water and Soil*.30(1):172-185. <https://doi.org/10.22067/jsw.v30i1.38048> (In Persian).
  37. Salehi, M. H., Khademi, H., and Karimian Egbal, M. 2003. Identification and formation processes of clay minerals in the soils of Farrokhsahr region, Chaharmahal and Bakhtiari Province. *Journal of Agricultural Science and Natural Resources*, 7(1), 73–89. (In Persian).
  38. Thomas, G.W. 1996. Soil pH and soil activity. In: Sparks, D.L. (Eds), *Methods of soil analysis, Part 3-Chemical Methods*. Agronomy Monograph, vol. 9. American Society Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, pp 475-490
  39. Wang, J. G., Zhang, F. S., Cao Y. P., and Zhang, X. L. 2000. Effect of plant types on release of mineral potassium from gneiss. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*56:3744. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1009826111929>
  40. Zareian, Gh. R., HadiFarpoor, M., Hejazi-Mehrizi, M., and Jafari, A. 2018. Kinetics of Non-exchangeable Potassium Release in Selected Soil Orders of Southern Iran. *Soil and Water Research*.13(4):200-207. <https://doi.org/10.17221/138/2017-SWR>.



## The Effect of Moisture on the Sulfur Oxidation and Some Chemical Properties of Saline and Non-Saline Soils

Jalal Ghaderi<sup>a\*</sup>, Mohammad Hossein Davoodi<sup>b</sup>, Neda Mohammadi<sup>c</sup>, and Kamal Khalkhal<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Soil and Water Research Department, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Iran.

<sup>b</sup> Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran.

<sup>c</sup> Soil and Water Research Department, East Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Iran.

### Article Info

**Article Type**  
Research Article

**Received**  
August 12, 2025  
**Revised**  
November 26, 2025  
**Accepted**  
December 06, 2025  
**Published online**  
December 20, 2025

**Keywords**  
Moisture,  
Oxidation,  
Soil Salinity,  
Thiobacillus,  
Vermicompost

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

### Extended Abstract

**Background and Objectives:** Sulfur is the fourth most essential and commonly required nutrient for all living organisms, including plants, animals, humans, and microorganisms. The effectiveness of elemental sulfur depends on its degree of oxidation, a process driven by both chemical and biological mechanisms. Various soil variables, such as pH, texture, temperature, moisture content, and salinity can influence sulfur oxidation in soils. Globally, and particularly in Iran, soil salinity poses a significant threat to agricultural productivity and food security. In Iran, more than 50% of soils are affected by salinity constraints. Soil moisture is also a critical variable for the biological oxidation of sulfur. However, the interactive effects of soil moisture and salinity on sulfur-oxidizing microbial communities and the oxidation process remain unclear. Therefore, the aim of this study was to investigate the effect of sulfur application under different moisture conditions on sulfur oxidation and on selected chemical properties of six soil series with varying characteristics and salinity levels.

**Materials and Methods:** In this study, numerous soil samples were collected from across the country (Iran) at a depth of 0–30 cm. Following chemical analysis, six soil samples with different salinity levels were selected. The effects of two moisture contents (40% and 60% of saturation) and three sulfur application rates (0, 500, and 1000 kg/ha), sourced from the Research Institute of Petroleum Industry, along with the bacterium *Thiobacillus*, were evaluated. The experiment was conducted in a completely randomized block design with three replicates for each treatment, and incubated for one year at a constant temperature of 25°C in the incubation chamber of the Soil and Water Research Institute laboratory.

**Results:** The results indicated that in non-saline and slightly saline soils (electrical conductivity less than 4 dS/m), sulfur application significantly decreased soil pH and increased electrical conductivity, as well as the availability of phosphorus, iron, zinc, and sulfate. The most pronounced reduction in pH and enhancement of nutrient availability in these soils were observed in the treatment with 1000 kg S/ha under 40% moisture saturation. In contrast, in highly saline soils (electrical conductivity greater than 8 dS/m), the effect of sulfur on these properties was markedly limited and, in most cases, non-significant. Furthermore, the highest rate of sulfur oxidation across all soil types was recorded in the 500 kg S/ha treatment under 40% moisture. Increasing the moisture level to 60% led to a reduction in the oxidation rate across all salinity levels, attributable to decreased oxygen availability and suppressed microbial activity. The highest sulfur oxidation rate ( $195.5 \mu\text{g S cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ) was measured in the saline Lenjan soil, while the lowest rate ( $2.4 \mu\text{g S cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ) was recorded in the highly saline Jazoushi soil on the 25th day of incubation.

**Conclusion:** These results highlight sulfur's potential as an effective amendment for improving chemical properties in non-saline, and mildly saline soils. For saline soils, pre-treatment methods such as leaching are strongly recommended to enhance sulfur's effectiveness.

---

**Cite this article:** Ghaderi, J., Davoodi, M.H., Mohammadi, N., Khalkhali, K., 2025. The Effect of Moisture on the Sulfur Oxidation and Some Chemical Properties of Saline and Non-Saline Soils. *Journal of Soil Research*, 39 (3), pp 303-320.



**DOI:** [10.22092/IJSR.2025.370175.782](https://doi.org/10.22092/IJSR.2025.370175.782)

**Publisher:** Soil Science Society of Iran

---



## تأثیر رطوبت بر اکسایش گوگرد و برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک‌های شور و غیر شور

جلال قادری<sup>۱\*</sup>، محمدحسین داوودی<sup>۲</sup>، ندا محمدی<sup>۳</sup> و کمال خلخال<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایران.

<sup>۲</sup> مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

<sup>۳</sup> بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی، ایران.

### چکیده

### اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۲۹

### واژه‌های کلیدی

اکسایش،

تیوباسیلوس،

رطوبت خاک،

شوری خاک،

ورمی کمپوست

این پژوهش با هدف بررسی تأثیر کاربرد همزمان گوگرد (۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم در هکتار) و باکتری تیوباسیلوس، در دو سطح رطوبتی متفاوت (۴۰ و ۶۰ درصد رطوبت اشباع) بر اکسایش گوگرد و برخی ویژگی‌های شیمیایی شش نوع خاک با سطوح متفاوت شوری انجام شد. نتایج نشان داد که در خاک‌های غیرشور و کم‌شور (EC کمتر از ۴ دسی‌زیمنس بر متر)، کاربرد گوگرد به طور معنی‌داری باعث کاهش pH و افزایش EC، فسفر، آهن، روی و سولفات قابل جذب خاک گردید. بیشترین کاهش pH و افزایش غلظت عناصر غذایی در این خاک‌ها در تیمار ۱۰۰۰ کیلوگرم گوگرد و رطوبت ۴۰ درصد مشاهده شد. در مقابل، در خاک‌های با شوری بالا (EC بیشتر از ۸ دسی‌زیمنس بر متر)، تأثیر گوگرد بر این ویژگی‌ها بسیار محدود و در اغلب موارد غیرمعنی‌دار بود. بیشترین میزان اکسایش گوگرد در کلیه خاک‌ها در تیمار ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار گوگرد و رطوبت ۴۰ درصد ثبت شد. افزایش رطوبت به ۶۰ درصد، به دلیل کاهش اکسیژن و فعالیت میکروبی، موجب کاهش سرعت اکسایش در تمامی سطوح شوری گردید. بیشترین نرخ اکسایش گوگرد (۱۹۵/۵ میکروگرم بر سانتی‌متر مربع در روز) در خاک لنجان (شور) و کمترین نرخ (۲/۴ میکروگرم بر سانتی‌متر مربع در روز) در خاک جنوشی (شدیداً شور) و در روز ۲۵ انکوباسیون اندازه‌گیری شد. نتایج این مطالعه نشان داد که گوگرد می‌تواند به‌عنوان یک اصلاح‌کننده مؤثر برای بهبود ویژگی‌های شیمیایی خاک، به‌ویژه در خاک‌های غیرشور و با شوری کم، مورد استفاده قرار گیرد. با این حال در خاک‌های شور، پیش‌تصفیه (مانند شست‌وشو) برای افزایش کارایی گوگرد توصیه می‌شود.

\* ایمیل نویسنده مسئول

[ghaderijalal@gmail.com](mailto:ghaderijalal@gmail.com)

استناد: قادری، ج، داوودی، م.ح، محمدی، ن، خلخال، ک. ۱۴۰۴. تأثیر رطوبت بر اکسایش گوگرد و برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک‌های شور و

غیرشور. مقاله پژوهشی، نشریه پژوهش‌های خاک، (۳) ۳۹، ص ۳۲۰-۳۰۳.

DOI:10.22092/IJSR.2025.370175.782



## مقدمه

شوری خاک یک تهدید جدی برای تولید محصولات کشاورزی و امنیت غذایی در سطح دنیاست (Shahbazi et al., 2024). شوری با ایجاد تنش اسمزی، سمیت یون‌های خاص (مانند سدیم و کلر) و اختلال در جذب آب و عناصر غذایی، اثرات منفی شدیدی بر خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک گذاشته و در نهایت منجر به کاهش رشد و بهره‌وری محصولات می‌شود. در ایران نیز از ۱۸/۵ میلیون هکتار اراضی قابل کشت، ۸ میلیون هکتار اراضی آبی بوده که ۶/۸ میلیون هکتار آن به درجات مختلف شوری مبتلا هستند. از این میزان، ۴/۳ میلیون هکتار فقط محدودیت شوری دارند و ۲/۵ میلیون هکتار افزون بر شوری دارای محدودیت‌های مربوط به ویژگی‌های ذاتی خاک (بافت، عمق، ضریب آبگذری، نفوذپذیری، پستی‌وبلندی، فرسایش خاک و آب زیرزمینی نیز هستند (Shahbazi et al., 2024). برای مقابله با این چالش، راهکارهای مختلفی از جمله شستشوی خاک، استفاده از مواد آلی و کاربرد اصلاح‌کننده‌های شیمیایی مختلف مانند سولفات کلسیم (ژپس<sup>۱</sup>)، اسیدسولفوریک و گوگرد عنصری ارائه شده است. در میان این روش‌ها، استفاده از گوگرد عنصری به دلیل هزینه پایین، در دسترس بودن و قابلیت تبدیل به اسیدسولفوریک، به‌عنوان یک راهکار مؤثر و اقتصادی برای بهبود ویژگی‌های شیمیایی خاک‌های شور و قلیایی مورد توجه قرار گرفته است.

گوگرد یک عنصر غذایی ضروری برای گیاهان است که در تشکیل اسیدهای آمینه، پروتئین‌ها و سولفولیبیدها نقش دارد (Hammerschmidt et al., 2024). گوگرد و مشتقات آن نقش محافظتی در برابر تنش‌های غیرزیستی دارند (Islam et al., 2024). گیاهان برای سنتز سیستمین به گوگرد نیاز دارند که به‌عنوان دهنده یا پیش‌ساز مواد حیاتی مانند متیونین، گلوتاتیون و سایر ترکیبات حاوی گوگرد عمل می‌کند (Li Q., 2020; Yadav et al., 2021). رایج‌ترین کودهای گوگردی مورد استفاده، بر پایه سولفات ( $SO_4-S$ ) یا گوگرد عنصری ( $S^0$ ) هستند؛ اما برخلاف کودهای سولفاتی (مانند سولفات آمونیوم) که به‌راحتی می‌توانند از ناحیه ریشه شسته شوند، گوگرد عنصری در خاک محلول نیست و در نتیجه تحت آبشویی قرار نمی‌گیرد. از آنجا که گوگرد عنصری فاقد ماده حامل (مانند یون آمونیوم یا کلسیم) است و درصد خلوص بالایی دارد، مقدار ماده مورد نیاز برای حمل و نقل و کاربرد در واحد سطح به‌طور قابل توجهی در مقایسه با منابع سولفاتی کاهش می‌یابد که این امر منجر به صرفه‌جویی در هزینه می‌شود (Degryse et al., 2021). با این حال، برای اینکه برای جذب گیاه در دسترس باشد، باید به سولفات اکسید شود. برای حل شدن

گوگرد عنصری و اکسایش آن، به باکتری‌هایی نیاز است که بتوانند آن را به سولفات‌های قابل‌دسترس برای گیاه ( $SO_4^{2-}$ ) اکسید کنند (Degryse et al., 2021). چندین گونه خاص از باکتری‌های خاکزی، مانند جنس تیوباسیلوس (Germida and Janzen, 1993) اکسایش گوگرد را تسهیل می‌کنند و فراوانی نسبی آن‌ها به محتوای گوگرد خاک پاسخ مثبت می‌دهد (Zhao et al., 2022).

متغیرهای خاکی متنوعی مانند pH، بافت خاک، دما، میزان آب و شوری خاک می‌توانند بر اکسایش گوگرد در خاک تأثیر داشته باشد (Zhao et al., 2022). با این حال، چگونگی تعامل محتوای آب و شوری خاک برای تأثیرگذاری بر جوامع میکروبی اکسیدکننده گوگرد و اکسایش گوگرد مشخص نیست. شوری مسئله‌ای است که طی سال‌های گذشته در مناطق مختلفی در جهان در حال گسترش بوده و تولید محصولات کشاورزی کاهش داده است (de Souza Freitas et al., 2019). میزان آب خاک نیز یک متغیر حیاتی برای اکسایش زیستی گوگرد است. هنگامی که میزان آب خاک کم است، به‌دلیل کمبود آب، از رشد میکروارگانیسم‌های اکسیدکننده گوگرد جلوگیری می‌شود. علاوه بر این، لایه‌های نازک آب حرکت باکتری‌ها را محدود می‌کنند و باکتری‌ها نمی‌توانند به سطح ذرات گوگرد دسترسی پیدا کنند (Zhao et al., 2022). هنگامی که میزان آب خاک زیاد است، به‌دلیل انتشار بسیار کندتر اکسیژن در آب نسبت به هوا، در دسترس بودن اکسیژن به یک عامل محدودکننده تبدیل می‌شود. Zhao و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای که با هدف بررسی تأثیر هم‌زمان بافت خاک و رطوبت بر فعالیت جامعه باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد و نرخ اکسایش انجام شد، گزارش کردند که در دو سطح رطوبتی ۴۰ و ۶۰ درصد ظرفیت نگهداری آب، میزان اکسایش در خاک لوم شنی به‌طور قابل توجهی بالاتر از خاک لوم سیلتی بود. آن‌ها این نتیجه را به تهویه بهتر و دسترسی بیشتر به اکسیژن در خاک‌های با بافت سبک‌تر نسبت دادند. همچنین در خاک لوم شنی، سرعت اکسایش با افزایش میزان رطوبت از ۴۰ به ۶۰ درصد افزایش یافت که حاکی از رسیدن به نقطه بهینه رطوبتی برای فعالیت میکروارگانیسم‌ها در آن بافت خاص بود. Ghaderi و همکاران (۲۰۱۹) در یک مطالعه پایه گزارش کردند که با کاربرد گوگرد در شرایط مختلف رطوبتی (۴۰ و ۶۰ درصد) در خاک‌های معمولی، pH کاهش، هدایت الکتریکی، فسفر، آهن و روی قابل جذب، سولفات محلول خاک افزایش یافت و رطوبت ۴۰ درصد به‌عنوان شرایط بهینه شناسایی شد.

<sup>۱</sup> Gypsum

## مواد و روش‌ها

### محل مطالعه و تهیه نمونه‌های خاک

در این پژوهش ابتدا ۳۴ نمونه خاک از عمق ۰ تا ۳۰ سانتیمتری سطح خاک‌های مختلف کشور جمع‌آوری شد. مشخصات محل نمونه‌برداری و خصوصیات شیمیایی و فیزیکی سری خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. این خاک‌ها در پنج دسته خاک غیر شور با هدایت الکتریکی کمتر از ۲ dS/m (خاک‌های دره بید و کم سرخ)، خاک کم شور با هدایت الکتریکی ۲ تا ۴ dS/m (خاک بوشگان)، خاک شور با هدایت الکتریکی ۴ تا ۸ dS/m (خاک لنجان)، خاک خیلی شور با هدایت الکتریکی ۸ تا ۱۶ dS/m (خاک ابراهیم آباد) و خاک شدید شور با هدایت الکتریکی بیش از ۱۶ dS/m (خاک جذوشی) تقسیم‌بندی شدند (جدول ۱).

اگرچه مطالعات متعددی اثر رطوبت بر اکسایش گوگرد در خاک‌های غیرشور را بررسی کرده‌اند، اما پاسخ فرایندهای شیمیایی و میکروبی مرتبط با اکسایش گوگرد در خاک‌های با درجات مختلف شوری، به‌ویژه در شرایط رطوبتی متفاوت، هنوز به‌طور کامل شناخته‌نشده است. در بسیاری از مناطق کشاورزی ایران، شوری خاک به‌عنوان یک چالش اساسی در کاهش بهره‌وری محسوب می‌شود، اما تأثیر متقابل شوری و رطوبت بر کارایی اصلاح‌کننده گوگرد به‌خوبی بررسی نشده است. این خلأ دانشی، نیاز به مطالعه‌ای جامع در این زمینه را آشکار می‌سازد. هدف اصلی این پژوهش، بررسی هم‌زمان تأثیر سطوح مختلف شوری خاک و رطوبت بر کارایی اصلاح‌کننده گوگرد در تغییر برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک و میزان اکسایش گوگرد است.

جدول ۱- مشخصات منطقه نمونه‌برداری و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد آزمایش

Table 1. Characteristics of the sampling area and the physical and chemical properties of the studied soils

مشخصات منطقه							
Region characteristics							
	Region 1	Region 2	Region 3	Region 4	Region 5	Region 6	
استان Province	اصفهان Isfahan	کرمان Kerman	بوشهر Bushehr	اصفهان Isfahan	خراسان Khorasan	خوزستان Khuzestan	
منطقه Region	فریدون Fereydun	جیرفت و مسافرآباد Jiroft & Mosafarabd	اراضی پشتکوه Pashkooch Lands	اصفهان Isfahan	دشت اسفراین Esfarayen Plain	رامهرمز Ramhormoz	
سری Series	دره بید Dareh Bid	کم سرخ Kam Sorkh	بوشگان Bushgan	لنجان Lenjan	ابراهیم آباد Ebrahim Abad	جذوشی Jadushi	
عرض جغرافیایی Latitude	50° 27' 37"	57° 53' 06"	51° 42' 15"	52° 00' 50"	40° 90' 60.2"	49° 31' 02"	
طول جغرافیایی Longitude	33° 04' 56.4"	28° 06' 36"	28° 47' 53"	32° 34' 03"	50° 83' 50"	31° 13' 33"	
خصوصیات خاک							
Soil properties							
pH (1:2.5)	-	7.65	7.97	7.69	7.82	8.00	8.06
EC	dS m <sup>-1</sup>	0.11	1.15	2.67	8.60	12.66	18.60
OC	%	0.54	0.25	0.88	0.56	0.22	0.70
P	mg kg <sup>-1</sup>	20.2	12.6	3.5	13.00	4.40	1.00
Fe	mg kg <sup>-1</sup>	8.2	3.00	6.00	6.3	4.40	0.80
Zn	mg kg <sup>-1</sup>	0.5	0.5	0.5	0.6	0.4	0.6
CEC	meq 100 g <sup>-1</sup>	23.4	11.2	14.6	14.2	11.4	9.2
CCE	%	14.9	16.6	49.9	34.3	21.00	17.00
S	mg kg <sup>-1</sup>	2.00	116.00	356.25	827.5	912.5	540.00
SP	%	38.00	28.00	47.00	41.00	39.00	44.00
بافت Texture	-	Silty Clay	Loam	Silty Clay	Silty Clay Loam	Clay Loam	Sandy Loam

## طرح آزمایشی

آزمایش به صورت طرح فاکتوریل دو فاکتور بر پایه بلوک‌های کامل تصادفی و در سه تکرار برای هر تیمار انجام شد. فاکتور اول سطح مصرف گوگرد (۰ (شاهد)، ۵۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم در هکتار) و فاکتور دوم رطوبت خاک در دو سطح (۴۰ و ۶۰ درصد رطوبت اشباع) بود. این آزمایش، به مدت یک سال، در درجه حرارت ثابت ۲۵ درجه سانتی‌گراد در اتاقک انکوباتور آزمایشگاه مؤسسه تحقیقات خاک و آب در کرج بررسی شد.

## آنالیز شیمیایی خاک

نمونه‌های خاک پس از آماده‌سازی، هوا خشک شده و از الک ۲ میلی‌متر عبور داده و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن در آزمایشگاه تعیین شد. برای تجزیه نمونه‌های خاک، بافت به روش هیدرومتری (Bouyoucos, 1962)، pH و قابلیت هدایت الکتریکی (EC) در عصاره ۱:۲/۵ (Shahbazi et al., 2024)، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) به روش باور (Bawer et al., 1952)، کربنات کلسیم معادل (CCE) به روش تیتراسیون با اسید (Allison and Moodie, 1965)، کربن آلی به روش اکسایش تر (Nelson and Sommers, 1996)، غلظت نیتروژن کل به روش کجلدال (TN) (Bremner, 1996)، غلظت فسفر قابل جذب به روش بی‌کربنات سدیم ۰/۵ مولار (Olsen, 1954)، غلظت پتاسیم قابل جذب با عصاره‌گیر استات آمونیوم (Knudsen et al., 1982)، غلظت آهن، روی، منگنز و مس قابل استخراج با عصاره‌گیر DTPA (Lindsay and Norvell, 1978)، غلظت سولفات قابل جذب با استفاده از روش Chesnin و Yien (1951) اندازه‌گیری شدند.

## اعمال تیمار و انکوباسیون

برای انجام آزمایش، ابتدا مقدار ۸۰۰ گرم خاک هوا خشک در داخل ظرف‌های پلاستیکی ۱۵۰۰ میلی‌لیتری ریخته شد. سپس نسبت به اعمال تیمارهای کودی همراه با باکتری تیوباسیلوس اقدام شد. در این آزمایش به ازای هر ۵۰ کیلوگرم کود گوگرد مصرفی، یک کیلوگرم باکتری تیوباسیلوس از گونه *T. neapolitanus* استفاده شد. مقادیر گوگرد مصرفی با فرض وزن یک هکتار، سه میلیون کیلوگرم محاسبه و مقدار یکنواخت ۱۰ تن در هکتار ورمی‌کمپوست به تمامی تیمارها اضافه شد. در تمامی تیمارها، از جمله شاهد، مقدار برابر ورمی‌کمپوست و سوسپانسیون باکتری تیوباسیلوس مطابق با پروتکل استاندارد به خاک افزوده شد تا اثر هر دو عامل در بین تیمارها یکسان باشد و تنها تفاوت بین سطوح مختلف گوگرد و مقادیر رطوبت بررسی شود. این کار با دو هدف اصلی انجام گرفت: الف) فراهم کردن یک منبع پایه کربن و انرژی برای تضمین بقا و فعالیت اولیه جمعیت باکتریایی (*Thiobacillus*) در تمام خاک‌ها، صرف نظر از حاصلخیزی اولیه متفاوت آن‌ها. ب) خنثی کردن اثرات احتمالی تفاوت در ماده آلی اولیه، به عبارت دیگر با اضافه کردن یک منبع آلی یکسان به همه تیمارها، باعث می‌شود که هر تغییر مشاهده شده در پارامترها (مانند pH، EC، اکسایش گوگرد) را با اطمینان بیشتری به اثر متقابل شوری، رطوبت و گوگرد نسبت داد، نه به تفاوت در مواد آلی خاک؛ بنابراین، ورمی‌کمپوست و باکتری تیوباسیلوس به عنوان شرایط ثابت و ضروری برای اجرای صحیح آزمایش در نظر گرفته شده و نقش آن‌ها تضمین این است که فرایند اکسایش گوگرد (که محور اصلی مطالعه است) به دلیل کمبود مواد آلی یا جمعیت باکتریایی، محدود نشود. برخی خصوصیات شیمیایی ورمی‌کمپوست مصرفی در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- برخی خصوصیات شیمیایی ورمی‌کمپوست مورد استفاده

Table 2. Selected chemical properties of the used vermicompost

پارامتر Parameter	مقدار Value	واحد Unit
pH	7.54	-
قابلیت هدایت الکتریکی (Electrical Conductivity)	17.58	dS/m
رطوبت (Moisture)	7.29	%
نیتروژن کل (Total N)	1.55	%
OC	24.88	%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.37	%
K <sub>2</sub> O	0.24	%
Fe	11978	mg/kg
Zn	239	mg/kg
Pb	44.5	mg/kg
Cd	3.00	mg/kg
گوگرد محلول (Soluble S)	0.089	%
گوگرد کل (Total S)	0.67	%

## تجزیه و تحلیل آماری

برای انجام تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار آماری MSTAT-C استفاده شد و مقایسه میانگین‌ها بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن و در سطح احتمال یک درصد صورت گرفت.

## نتایج و بحث

### تأثیر مقدار گوگرد در شرایط رطوبتی بر اکسایش گوگرد در زمان‌های مختلف انکوباسیون خاک

اکسایش گوگرد فرایند تشکیل  $SO_4^{2-}$  با اکسایش  $S^0$ ،  $H_2S$  و سولفید ( $S^{2-}$ ) توسط برخی از میکروب‌های اکسید کننده گوگرد است (Chaudhary et al., 2023). گوگرد عنصری ابتدا به صورت آنزیمی به سولفید یا سولفیت تبدیل می‌شود و سپس به شکل نهایی سولفات اکسید می‌شود. اکسایش زیستی گوگرد طبق رابطه  $S \rightarrow S_2O_2^{3-} \rightarrow S_4O_2^{6-} \rightarrow SO_4^{2-}$  انجام می‌شود (Chaudhary et al., 2023). مطالعه حاضر نشان داد که با افزایش سطح مصرف گوگرد در شرایط مختلف رطوبتی، مقدار اکسایش گوگرد به‌طور معنی‌دار کاهش یافت ( $p < 0.05$ ). بیشترین مقدار اکسایش با کاربرد ۵۰۰ کیلوگرم گوگرد بر هکتار و در شرایط ۴۰ درصد رطوبت اشباع مشاهده شد. اکسایش در مدت زمان ۲۵ روز به اوج رسید و سپس کاهش یافت. کمترین و بیشترین مقدار اکسایش در بین شش نمونه خاک مورد آزمایش به ترتیب در خاک‌های جذوشی و لنجان به مقدار ۲/۴ و ۱۹۵/۵ میکروگرم گوگرد بر سانتی‌متر مربع در روز مشاهده شد (جدول ۳). در این تحقیق مقدار اکسایش در خاک‌های با شوری کمتر از ۸، بیش‌تر از خاک‌های شورتر بود که ممکن است ناشی از شرایط مناسب برای فعالیت ریزجانداران اکسید کننده گوگرد باشد.

در این مطالعه، پاسخ اکسایش گوگرد به سطوح مختلف مصرف، خطی نبود. در بیشتر خاک‌ها (به جز دره بید)، حداکثر نرخ اکسایش در تیمار ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار مشاهده شد و با افزایش میزان مصرف به ۱۰۰۰ کیلوگرم در هکتار، از کارایی اکسایش کاسته شد (جدول ۳). این الگوی غیر خطی می‌تواند ناشی از چندین مکانیسم بازدارنده در سطوح بالای گوگرد باشد. اولاً، تجمع سریع اسید سولفوریک و متعاقب آن کاهش شدید pH موضعی در اطراف ذرات گوگرد می‌تواند به‌طور مستقیم برای جمعیت باکتری‌های اکسید کننده گوگرد سمی باشد و فعالیت متابولیک آن‌ها را مهار کند (Germida and Janzen, 1993). ثانیاً، افزایش غلظت یون‌های سولفات و دیگر املاح محلول می‌تواند با ایجاد استرس اسمزی، فشار مضاعفی بر میکروارگانیسم‌ها وارد آورد. ثالثاً، در سطوح بسیار بالای گوگرد، امکان تشکیل لایه‌ای از مواد حد واسط اکسایش (مانند تیوسولفات) بر سطح ذرات گوگرد وجود دارد که این لایه به‌عنوان یک سد فیزیکی از

گوگرد مصرفی در پژوهشگاه صنعت نفت تهیه شده بود. گوگرد پاستیل، یک نوع کود گوگردی گرانوله به رنگ سبز متمایل به زرد بود که حاوی ۱۲ درصد رس بنتونیت و ۸۸ درصد گوگرد بود. با استفاده از پیست فاین جت، آب مقطر به نمونه‌های خاک اضافه تا به رطوبت موردنظر بر اساس تیمارهای رطوبتی ۴۰ و ۶۰ درصد رطوبت اشباع برسند. به‌منظور جلوگیری از تبخیر رطوبت و در عین حال حفظ امکان تبادلات گازی، سطح خاک گلدان‌ها با پارافیلیم پوشانده و چند سوراخ کوچک برای تهویه ایجاد شد. سپس ظرف‌ها در دمای مورد نظر در انکوباتور نگهداری شدند. کنترل رطوبت به‌وسیله روش وزنی و در فواصل ۴۸ الی ۷۲ ساعت انجام شد.

## اندازه‌گیری‌ها

در پایان هر دوره انکوباسیون که شامل زمان‌های برداشت تعیین شده (مانند ۰، ۳، ۷، ۱۵، ۲۵ و ... روز پس از آغاز آزمایش) بود، خاک‌ها از ظرف‌ها برداشته، خوب مخلوط شده و برای تجزیه‌های مختلف استفاده شد. pH و EC خاک در نسبت خاک به آب ۱:۲/۵ (W/V)، در زمان‌های صفر، ۳، ۷، ۱۵، ۲۵، ۴۰، ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ روز، غلظت فسفر، آهن و روی قابل جذب با استفاده روش‌های مذکور در بخش آنالیز شیمیایی خاک در زمان‌های صفر، ۴۰، ۸۰، ۱۲۰ و ۳۶۰ روز اندازه‌گیری شدند. غلظت سولفات قابل جذب در زمان‌های صفر، ۲۵، ۶۰ و ۳۶۰ روز به‌وسیله روش توربیدومتری (Chesnin and Yien, 1951) و میزان اکسایش گوگرد، در زمان‌های ۲۵، ۶۰ و ۳۶۰ روز با استفاده از معادله پیدشنهادی توسط Bettany و Janzen (1987) محاسبه شد (رابطه ۱).

$$K = (1 - (1 - m/m_0)^{1/3}) Z Do / 2t \quad (1)$$

- K: میزان اکسیداسیون (میکروگرم گوگرد در سانتی‌متر مربع در روز).
- m: جرم (میکروگرم) گوگرد اکسید شده (از طریق افزایش غلظت گوگرد قابل عصاره‌گیری با ۰/۱۵ درصد کلرور کلسیم در خاک تیمار شده نسبت به تیمار نشده در همان زمان محاسبه شد).
- $m_0$ : جرم گوگرد (میکروگرم) در زمان اولیه هر دوره نگهداری در انکوباتور.
- Z: دانسیته گوگرد ( $2.07 \times 10^6 \mu\text{g Cm}^{-3}$ ).
- t: زمان نگهداری در انکوباتور (روز).
- Do: قطر ذرات گوگرد در شروع هر دوره نگهداری در انکوباتور (۰/۰۷۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد).

سطوح مختلف کود گوگرد مصرفی کم‌تر شد. با افزایش محتوای رطوبت خاک، اکسیداسیون گوگرد افزایش یافته و به حد مطلوب می‌رسد، سپس با افزایش مجدد رطوبت به دلیل کاهش اکسیژن در منافذ خاک، از سرعت اکسایش گوگرد کاسته می‌شود. در رطوبت‌های کم‌تر از ظرفیت زراعی به دلیل محدودیت آب برای ریزجانداران اکسید کننده و در رطوبت‌های بالاتر به واسطه کمبود اکسیژن در خاک، اکسیداسیون گوگرد کاهش می‌یابد (Janzen and Bettany, 1987). شوری خاک نیز به دو علت، باعث کاهش سرعت اکسیداسیون گوگرد در خاک می‌شود؛ الف) شوری باعث افزایش پتانسیل (اسمزی) آب در خاک شده و قابلیت دسترسی آب را برای ریزجانداران اکسیدکننده کاهش می‌دهد. ب) غلظت زیاد آنیون‌ها و کاتیون‌های موجود در خاک شور با اثرات سمی که روی ریزجانداران دارد، فعالیت آن‌ها را کند یا متوقف ساخته و بر سرعت اکسایش گوگرد اثر منفی می‌گذارد.

تماس مستقیم باکتری‌ها با سوبسترای اصلی ( $S^0$ ) جلوگیری می‌کند و از این طریق نرخ اکسایش را محدود می‌سازد (Janzen and Bettany, 1987). این یافته که اکسایش در سطوح بالا به نقطه اشباع می‌رسد یا کاهش می‌یابد، با مشاهدات گزارش شده در مطالعات قبلی همسو بود (Ghaderi et al., 2019; Modaihs et al., 1989) و تأکیدی بر این مفهوم است که کاربرد گوگرد برای دستیابی به حداکثر کارایی، دوز بهینه دارد و مصرف بی‌رویه آن می‌تواند نتایج معکوس به همراه داشته باشد.

در یک آزمایش گلخانه‌ای گزارش شد که بهترین تیمار از لحاظ کاهش pH خاک و سولفات تولیدی، کاربرد ۲ تن بر هکتار گوگرد بود و سطوح بیش‌تر از آن تأثیری در مقدار گوگرد اکسیده شده نداشت (Kasraian, et al., 2012). نتایج این آزمایش همچنین نشان داد که با افزایش مقدار رطوبت خاک از ۴۰ به ۶۰ درصد رطوبت اشباع، مقدار اکسایش گوگرد در

جدول ۳- مقایسه میانگین تأثیر مقدار گوگرد در شرایط رطوبتی بر اکسایش گوگرد در زمان‌های مختلف انکوباسیون خاک

Table 3. Comparison of the mean effect of sulfur rate under different moisture conditions on sulfur oxidation at various soil incubation times

سری خاک Soil Series	گوگرد مصرفی Applied Sulfur (kg/ha)	رطوبت اشباع Saturation Moisture (%)	میزان اکسیداسیون گوگرد Sulfur Oxidation Rate ( $\mu\text{g S cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$ )		
			25 days	60 days	360 days
دره بید Dareh Bid	500	40	59.0 b	30.3 b	5.3 b
		60	50.0 c	24.7 c	5.0 b
	1000	40	77.0 a	41.7 a	9.0 a
		60	49.7 c	25.3 c	5.0 b
کم سرخ Kam Sorkh	500	40	37.6 a	24.3 a	4.6 a
		60	31.0 b	18.1 b	3.5 b
	1000	40	23.6 c	14.0 c	2.7 c
		60	15.4 d	9.9 d	2.1 d
بوشگان Bushgan	500	40	35.7 a	18.3 a	2.3 a
		60	22.3 c	15.0 b	2.0 a
	1000	40	26.8 b	15.3 b	2.0 a
		60	22.7 c	11.3 c	2.0 a
لنجان Lenjan	500	40	195.5 a	74.1 a	9.9 a
		60	133.4 b	54.8 b	8.7 b
	1000	40	82.9 c	32.0 c	5.1 c
		60	73.2 d	26.5 d	4.4 d
ابراهیم آباد Ebrahim Abad	500	40	32.9 a	9.7 a	1.4 a
		60	26.8 a	9.7 a	1.2 a
	1000	40	19.1 b	6.3 ab	0.8 a
		60	10.5 c	3.6 b	0.6 a
جدوشی Jadushi	500	40	5.9 a	4.5 a	1.5 a
		60	4.6 b	2.0 c	0.1 b
	1000	40	3.8 b	2.6 b	1.2 a
		60	2.4 c	1.3 c	0.2 b

\* حروف مشابه در هر ستون و برای هر سری خاک به طور مجزا، نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد است.

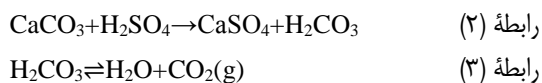
\*Similar letters within each column and for each soil series separately indicate no significant difference at the 5% level.

ماده آلی به تنهایی در تغییر پارامترهایی مانند pH و EC کم بوده است. ثانیاً، الگوی مشاهده شده در نرخ اکسایش که با افزایش رطوبت از ۴۰ به ۶۰ درصد (و در نتیجه کاهش اکسیژن) کاهش یافت، به وضوح از ماهیت زیستی-هوازی فرایند اکسایش در این

اگرچه طراحی این مطالعه فاقد تیمارهای کنترلی برای تفکیک سهم جداگانه باکتری و گوگرد بود، اما شواهد قوی از نقش مکمل این دو جزء حکایت دارد. اولاً، تغییرات ناچیز در تیمار شاهد (که حاوی ورمی کمپوست بود) نشان می‌دهد که سهم این

کیلوگرم گوگرد در هکتار، سطح رطوبت ۴۰ درصد و زمان ۴۰ روز) و جذوشی (در تیمار ۱۰۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار، سطح رطوبت ۴۰ درصد و زمان ۶۰ روز) کاهش جزئی pH را شاهد بودند ( $p > 0.05$ ). در خاک‌های با شوری بالا (ابراهیم‌آباد و جذوشی)، کاهش ناچیز pH علیرغم کاربرد گوگرد، می‌تواند به احتمال قوی ناشی از مهار فعالیت میکروبی باشد. شوری بالا با ایجاد استرس اسمزی و سمیت یونی می‌تواند باعث کاهش رشد و فعالیت جمعیت‌های میکروبی، از جمله باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد (مانند تیوباسیلوس) شود (Germida and Janzen, 1993; Zhao et al., 2022). علاوه بر این، ظرفیت بافری بالا در این خاک‌های شور و معمولاً آهکی، اسیدسولفوریک تولیدشده از اکسایش محدود را خنثی می‌کند؛ بنابراین، به نظر می‌رسد که مکانیسم اصلی در این خاک‌ها، کاهش نرخ اکسایش زیستی گوگرد به دلیل استرس شوری و در مرحله بعد، خنثی شدن اسید تولیدشده است که در نهایت مانع از کاهش قابل توجه pH می‌گردد؛ بنابراین توصیه می‌شود در خاک‌های شور قبل از مصرف گوگرد، روش‌های دیگر اصلاح (مانند شست‌وشو) استفاده شود تا شوری مانع اکسایش گوگرد نشود.

در روز ۳۶۰، pH خاک در تمامی تیمارها شروع به افزایش کرد که این موضوع نشان‌دهنده اثر موقتی اصلاح گوگردی و غلبه تدریجی ظرفیت بافری خاک است. مکانیسم احتمالی این بازگشت pH می‌تواند شامل مصرف تدریجی اسیدسولفوریک تولیدشده در واکنش با اجزای بافری خاک، به ویژه کربنات‌های کلسیم (آهک) باشد. واکنش‌های خنثی‌سازی زیر (رابطه ۲ و ۳) می‌توانند دلیل این پدیده باشند:



در این واکنش‌ها، اسیدسولفوریک قوی ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) با کربنات کلسیم که یک جزء بافری اصلی در خاک‌های آهکی ایران است، واکنش داده و به اسیدکربنیک ضعیف‌تر ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) و گچ ( $\text{CaSO}_4$ ) تبدیل می‌شود. اسیدکربنیک نیز به نوبه خود به آب و دی‌اکسید کربن تجزیه می‌شود که از خاک متصاعد می‌شود. در نتیجه، یون هیدروژن ( $\text{H}^+$ ) از سیستم حذف شده و pH افزایش می‌یابد. علاوه بر این، مواد آلی، اکسیدها و سیلیکات‌های خاک نیز می‌توانند در این ظرفیت بافری نقش داشته باشند. این فرایندها در نهایت منجر به خنثی‌سازی اسید تولید شده و بازگشت تدریجی pH به سطوح اولیه می‌شوند که بر موقتی بودن اثر اصلاح گوگردی در صورت عدم مصرف مداوم آن تأکید دارد. کاهش pH و افزایش اسید تولید شده در خاک‌های غیر شور و شوری پایین در اثر اکسایش گوگرد است به عبارت دیگر در حضور باکتری‌های تیوباسیلوس، گوگرد در خاک اکسید شده و با تولید اسیدسولفوریک

آزمایش حکایت دارد. این پاسخ فیزیولوژیکی قویاً نشان می‌دهد که جمعیت باکتریایی افزوده شده فعال بوده و سهم غالب در اکسید کردن گوگرد عنصری را داشته است؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات مشاهده شده عمدتاً حاصل اثر هم‌افزایی گوگرد (به‌عنوان سوبسترا) و باکتری‌های اکسیدکننده (به‌عنوان کاتالیزور زیستی) بود.

### تأثیر مقادیر مختلف گوگرد در شرایط مختلف رطوبتی بر pH خاک

نتایج نشان داد با افزایش سطوح گوگرد مصرفی (به ویژه ۱۰۰۰ کیلوگرم در هکتار) و در شرایط ۴۰ و ۶۰ درصد رطوبت اشباع، pH خاک در شش سری خاک مذکور کاهش یافت (جدول ۴). تحلیل منطقه به منطقه نشان داد که در خاک دره بید بیشترین کاهش pH در تیمار ۱۰۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار، سطح رطوبت ۴۰ درصد و زمان ۲۷۰ روز pH از ۷/۸۲ به ۷/۳۱ (۰/۵۱) (واحد) مشاهده شد ( $p < 0.01$ ). در خاک کم سرخ بیشترین کاهش pH در تیمار ۱۰۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار، سطح رطوبت ۴۰ درصد و زمان ۱۸۰ روز pH از ۷/۹ به ۷/۴۰ (۰/۵) (واحد) کاهش یافت ( $p < 0.01$ ). خاک‌های دره بید و کم سرخ بیشترین واکنش به گوگرد را نشان دادند که احتمالاً به دلیل شوری پایین و همچنین مقادیر کمتر کربنات کلسیم و ظرفیت تبادل کاتیونی پایین این دو خاک در مقایسه با سایر خاک‌ها بود. خاصیت بافری خاک به وجود رس، مواد آلی، آهک، ترکیبات فسفردار و بسیاری از ترکیبات شیمیایی دیگر وابسته است. هرگاه مقدار اسید تولیدشده در اثر اکسیداسیون گوگرد، توان خنثی‌کردن عوامل بافری را دارا باشد، pH خاک کاهش می‌یابد (Besharatiet al., 2017). در خاک بوشگان بیشترین کاهش pH در سطح کود ۱۰۰۰ kg/ha، سطح رطوبت ۴۰ درصد و زمان ۶۰ روز (pH) از ۷/۶۴ به ۷/۴۰ (۰/۲۴) (واحد) ثبت شد ( $p < 0.01$ ). در این نوع خاک با توجه به اینکه شوری کم (۲/۶۷) است اما کاهش pH کمتر از خاک‌های دره بید و کم سرخ است که یکی از دلایل آن غیر از شوری می‌تواند آهک بالای این خاک (حدود ۵۰ درصد) باشد.

گوگرد در هکتار، سطح رطوبت ۴۰ درصد و زمان ۴۰ روز (pH) از ۷/۷۹ به ۷/۷۶ (۰/۰۳) (واحد کاهش) مشاهده شد ( $p > 0.05$ ). کاهش ناچیز pH احتمالاً به شوری نسبتاً بالا (۶/۸) و همچنین درصد بالای آهک ( $\text{CCE} = 34.3\%$ ) مربوط می‌شود که اسید را خنثی می‌کند؛ بنابراین، در خاک‌های قلیایی و آهکی (لنجان و بوشگان)، گوگرد می‌تواند برای اصلاح pH مفید باشد، اما ممکن است نیاز به مقادیر بیشتر از ۱۰۰۰ کیلوگرم بر هکتار باشد. همانند خاک لنجان، خاک‌های ابراهیم‌آباد (در تیمار ۱۰۰۰

اشباع، که تقریباً معادل ظرفیت مزرعه است)، منجر به محدودیت تهویه و کاهش شدید انتشار اکسیژن در خاک می‌شود. از آنجایی که باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد (مانند تیوباسیلوس) هوایی هستند، این کاهش در دسترس بودن اکسیژن، فعالیت متابولیک و رشد آن‌ها را به طور قابل توجهی مهار می‌کند. در نتیجه، نرخ اکسایش گوگرد و تولید اسیدسولفوریک کاهش یافته و بنابراین، میزان کاهش pH نیز کمتر خواهد بود. الگوی مشاهده شده در داده‌های این پژوهش که نشان می‌دهد کاهش pH در تیمارهای با رطوبت ۶۰ درصد کمتر از تیمارهای با رطوبت ۴۰ درصد بود.

باعث کاهش pH خاک می‌شود. نتایج این تحقیق مبنی بر کاهش نرخ اکسایش گوگرد و در نتیجه، کاهش محدودتر pH در رطوبت ۶۰ درصد نسبت به رطوبت ۴۰ درصد، با یافته‌های مطالعات پیشین همچون Nelson و Tisdale (۱۹۵۸)، Kalbasi و همکاران (۱۹۸۸)، Kaplan و Orman (۱۹۹۸)، Orman و Kaplan (۲۰۰۹)، Hüseyin و Orman (۲۰۱۲)، Hashemimajd و همکاران (۲۰۱۲) و Ghaderi و همکاران (۲۰۱۹) همسو است. مکانیسم این پدیده بدین صورت است که افزایش رطوبت به بیش از نقطه بهینه (حدود ۴۰ درصد رطوبت

جدول ۴- مقایسه میانگین تأثیر مقادیر مختلف گوگرد در شرایط مختلف رطوبتی بر pH خاک

Table 4. Comparison of the mean effect of different sulfur levels under various moisture conditions on soil pH.

Sulfur (kg/ha)	SP (%)	3 day	7 day	15 day	25 day	40 day	60 day	120 day	180 day	270 day	360 day
Dareh Bid دره بید											
0	40	7.88 ab	7.87 ab	7.85 ab	7.85 a	7.83 a	7.81 ab	7.80 a	7.79 a	7.82 a	7.85 a
	60	7.92 a	7.91 a	7.89 a	7.88 a	7.86 a	7.84 a	7.82 a	7.81 a	7.84 a	7.88 a
500	40	7.85 ab	7.84 abc	7.80 bc	7.75 bc	7.72 bc	7.67 cd	7.62 c	7.53 c	7.47 c	7.52 c
	60	7.90 ab	7.88 a	7.85 ab	7.82 ab	7.78 ab	7.74 bc	7.71 b	7.63 b	7.57 b	7.65 b
1000	40	7.94 ab	7.79 bc	7.73 cd	7.67 c	7.57 d	7.45 e	7.36 e	7.32 d	7.31 d	7.39 d
	60	7.87 ab	7.84 abc	7.79 bc	7.74 bc	7.68 c	7.60 d	7.51 d	7.46 c	7.40 c	7.54 c
Kam Sorkh کم سرخ											
0	40	7.99 a	7.97 ab	7.96 ab	7.96 ab	7.94 ab	7.93 a	7.92 a	7.90 ab	7.93 a	7.97 ab
	60	8.03 a	8.02 a	8.00 a	7.99 a	7.98 a	7.96 a	7.94 a	7.93 a	7.96 a	8.00 a
500	40	7.98 a	7.96 ab	7.93 ab	7.88 b	7.81 c	7.75 b	7.68 b	7.75 c	7.83 b	7.92 b
	60	8.03 a	8.01 c	7.97 a	7.93 ab	7.87 bc	7.81 b	7.73 b	7.83 b	7.92 a	7.99 ab
1000	40	7.97 a	7.95 ab	7.88 bc	7.98 c	7.71 d	7.64 c	7.51 c	7.43 e	7.54 d	7.74 d
	60	8.00 a	7.99 ab	7.93 ab	7.91 ab	7.80 c	7.73 b	7.58 c	7.49 d	7.65 c	7.83 c
Bushgan بوشگان											
0	40	7.72 abcd	7.71 abc	7.69 ab	7.67 a	7.66 ab	7.64 ab	7.64 a	7.65 a	7.68 ab	7.70 ab
	60	7.76 a	7.75 a	7.74 a	7.72 a	7.70 a	7.68 a	7.68 a	7.69 a	7.76 a	7.73 a
500	40	7.71 abcd	7.69 bc	7.63 bcd	7.60 b	7.55 c	7.49 c	7.55 b	7.59 b	7.63 b	7.67 abc
	60	7.74 ab	7.73 ab	7.69 ab	7.66 a	7.62 b	7.58 b	7.64 a	7.65 a	7.68 ab	7.70 ab
1000	40	7.69 bcd	7.66 cd	7.55 de	7.51 c	7.45 d	7.40 d	7.47 c	7.54 b	7.56 c	7.60 c
	60	7.72 abc	7.70 abc	7.64 bc	7.60 b	7.54 c	7.50 c	7.56 b	7.58 b	7.64 b	7.63 bc
Lenjan لنجان											
0	40	7.83 ab	7.82 ab	7.82 ab	7.81 abc	7.79 ab	7.79 abc	7.80 ab	7.81 abc	7.83 ab	7.84 ab
	60	7.88 a	7.87 a	7.87 a	7.86 a	7.84 a	7.84 a	7.85 a	7.85 a	7.82 ab	7.87 a
500	40	7.82 ab	7.81 ab	7.80 ab	7.79 abc	7.78 ab	7.79 abc	7.80 ab	7.80 abc	7.82 ab	7.83 ab
	60	7.88 a	7.86 a	7.84 a	7.82 ab	7.81 ab	7.83 a	7.84 a	7.84 a	7.85 a	7.86 a
1000	40	7.81 ab	7.80 ab	7.79 ab	7.77 bc	7.76 abc	7.77 abc	7.78 abc	7.79 abc	7.80 ab	7.81 ab
	60	7.87 ab	7.84 ab	7.82 ab	7.79 abc	7.78 ab	7.81 ab	7.82 ab	7.82 ab	7.80 a	7.83 a
Ebrahim Abad ابراهیم آباد											
0	40	8.02 a	8.02 a	8.00 a	8.00 a	7.99 a	7.98 a	8.00 a	8.00 a	8.00 a	8.02 a
	60	8.04 a	8.04 a	8.03 a	8.02 a	8.00 a	7.99 a	8.02 a	8.03 a	8.03 a	8.04 a
500	40	8.00 a	8.00 a	7.98 a	7.97 a	7.96 a	7.96 a	7.97 a	7.98 a	7.99 a	8.00 a
	60	8.04 a	8.03 a	8.02 a	8.00 a	8.00 a	8.00 a	8.02 a	8.03 a	8.03 a	8.03 a
1000	40	8.00 a	7.79 a	7.98 a	7.96 a	7.95 a	7.95 a	7.96 a	7.97 a	7.98 a	7.99 a
	60	8.02 a	8.02 a	8.02 a	8.00 a	7.98 a	7.99 a	8.00 a	8.00 a	8.02 a	8.02 a
Jadushi جدوشی											
0	40	8.23 a	8.23 a	8.22 a	8.22 a	8.21 a	8.21 a	8.21 a	8.22 a	8.23 a	8.23 a
	60	8.25 a	8.25 a	8.24 a	8.24 a	8.23 a	8.23 a	8.23 a	8.24 a	8.25 a	8.25 a
500	40	8.22 a	8.21 a	8.19 a	8.16 a	8.14 a	8.15 a	8.15 a	8.17 a	8.19 a	8.21 a
	60	8.25 a	8.24 a	8.23 a	8.20 a	8.17 a	8.18 a	8.19 a	8.21 a	8.22 a	8.24 a
1000	40	8.23 a	8.22 a	8.20 a	8.18 a	8.18 a	8.17 a	8.19 a	8.20 a	8.21 a	8.22 a
	60	8.24 a	8.24 a	8.23 a	8.21 a	8.20 a	8.21 a	8.22 a	8.22 a	8.23 a	8.24 a

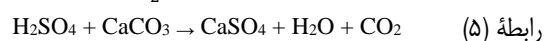
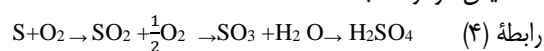
\* حروف مشابه در هر ستون و برای هر سری خاک به‌طور مجزا، نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد است.

\*Similar letters within each column and for each soil series separately indicate no significant difference at the 5% level.

افزایش معنی‌دار هدایت الکتریکی خاک در پاسخ به کاربرد گوگرد، به‌طور مستقیم ناشی از فرایند اکسایش زیستی گوگرد و تولید اسیدسولفوریک بود. این اسید ضمن کاهش pH، باعث انحلال ترکیبات معدنی خاک (از جمله کربنات‌ها، فسفات‌ها و اکسیدهای فلزی) شده و مقادیر قابل توجهی از یون‌های محلول نظیر  $SO_4^{2-}$ ،  $Ca^{2+}$ ،  $Mg^{2+}$ ،  $Fe^{2+}$  و  $Zn^{2+}$  را در محلول خاک آزاد می‌کند (Abdel-Fattah et al., 2005; Safaa et al., 2013). روند افزایشی EC در طول زمان انکوباسیون نشان‌دهنده تداوم فعالیت میکروبی و پیشرفت تدریجی فرایند اکسایش و انحلال بود، به‌طوری‌که حداکثر تجمع یون‌های محلول و در نتیجه بیشینه مقدار EC در پایان دوره آزمایش (۳۶۰ روز) ثبت شد. این الگو کاملاً منطبق بر یافته‌های Hashemimajd و همکاران (۲۰۱۲) و Ghaderi و همکاران (۲۰۱۹) بود که آن را به تدریجی بودن واکنش‌های اکسایش و نیاز به زمان کافی برای تکمیل فرایندهای شیمیایی و میکروبی نسبت داده‌اند. در خاک‌های آهکی، واکنش اسید سولفوریک با کربنات کلسیم و تولید گچ که حلالیت نسبتاً بالایی دارد، سهم عمده‌ای در افزایش شوری داشت (Orman and Hüseyin, 2012; El-Kholy et al., 2014).

### تأثیر مقادیر مختلف گوگرد در شرایط مختلف رطوبتی بر هدایت الکتریکی خاک (EC)

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که با افزایش مقدار گوگرد مصرفی در شرایط ۴۰ و ۶۰ درصد رطوبت اشباع، EC خاک افزایش یافت (جدول ۵). بیشترین مقدار EC مربوط به تیمار ۱۰۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار و رطوبت ۴۰ درصد بود که عمدتاً ناشی از تولید و انباشت یون سولفات (حاصل از اکسایش گوگرد) و همچنین آزادسازی یون‌های دیگر در اثر انحلال املاح خاک توسط اسید تولیدشده بود. نتایج این تحقیق نشان داد که مقدار افزایش EC در سری خاک‌های غیر شور و شوری کم (دره بید، کم سرخ، بوشگان و لنجان) نسبت به خاک‌های شور (ابراهیم‌آباد و جذوشی) بیش‌تر بود که این ناشی از مقدار اکسایش بیش‌تر گوگرد، تولید اسیدسولفوریک، کاهش بیش‌تر pH خاک و در نتیجه حل شدن ترکیبات محلول در خاک است. در بین خاک‌های مختلف، بیشترین میزان افزایش EC مربوط به خاک‌های آهکی بوشگان و لنجان بود که در اثر اکسایش گوگرد در خاک اسیدسولفوریک تولید شده با کربنات‌های کلسیم و منیزیم واکنش داده و موجب انحلال آن‌ها می‌شود (رابطه ۴ و ۵). در نتیجه تشکیل املاح محلول و تشکیل سولفات‌های کلسیم (گچ) و منیزیم در خاک، EC خاک افزایش می‌یابد (Slaton, 1998)؛ بنابراین، علت افزایش EC را می‌توان به تجمع نمک‌های حاصل از اکسایش گوگرد نسبت داد.



جدول ۵- مقایسه میانگین تأثیر مقادیر مختلف گوگرد در شرایط مختلف رطوبتی بر قابلیت هدایت الکتریکی خاک (EC)

Table 5. Comparison of the mean effect of different sulfur levels under various moisture conditions on soil electrical conductivity (EC).

Sulfur (kg/ha)	SP (%)	3 day	7 day	15 day	25 day	40 day	60 day	120 day	180 day	270 day	360 day
دره بید Dareh Bid											
0	40	0.13 b	0.14 b	0.16 cd	0.18 cd	0.19 d	0.20 c	0.20 de	0.21 ef	0.21 e	0.22 e
	60	0.10 b	0.12 b	0.13 d	0.14 d	0.15 d	0.16 c	0.19 e	0.18 f	0.19 e	0.19 e
500	40	0.14 b	0.15 b	0.17 bcd	0.22 bcd	0.29 cd	0.34 c	0.43 cd	0.50 cd	0.54 d	0.52 cd
	60	0.13 b	0.14 b	0.16 bcd	0.20 cd	0.24 cd	0.26 c	0.30 cde	0.37 de	0.40 a	0.42 d
1000	40	0.16 b	0.18 b	0.22 bc	0.29 bc	0.36 c	0.46 c	0.52 c	0.62 c	0.67 d	0.70 c
	60	0.14 b	0.15 b	0.20 bcd	0.23 bcd	0.31 cd	0.35 c	0.42 cd	0.49 cd	0.57 d	0.62 c
کم سرخ Kam Sorkh											
0	40	0.81 d	0.82 d	0.84 d	0.86 e	0.87 d	0.90 e	0.92 e	0.94 f	0.96 f	0.98 f
	60	0.52 c	0.54 f	0.56 e	0.58 f	0.59 e	0.61 f	0.62 f	0.64 g	0.66 g	0.67 g
500	40	0.85 e	0.90 cd	0.99 c	1.05 d	1.13 c	1.19 d	1.30 d	1.35 d	1.39 d	1.42 d
	60	0.71 c	0.73 e	0.80 d	0.85 e	0.92 d	0.98 e	1.05 e	1.10 e	1.14 e	1.19 e
1000	40	0.94 d	0.99 b	1.13 b	1.21 c	1.30 c	1.00 c	1.64 c	1.69 c	1.72 c	1.76 c
	60	0.82 b	0.89 d	0.97 c	1.03 d	1.14 c	1.21 d	1.35 d	1.40 d	1.45 d	1.49 d
بوشگان Bushgan											
0	40	2.13 b	2.15 c	2.18 c	2.21 c	2.24 bcd	2.29 c	2.31 c	2.33 c	2.35 b	2.37 c
	60	0.78 e	0.82 f	0.84 g	0.86 f	0.87 e	0.90 d	0.92 d	0.91 d	0.97 c	1.00 d
500	40	2.05 b	2.37 bc	2.62 b	2.73 b	2.83 ab	2.94 b	3.04 b	3.10 b	3.10 ab	3.11 b
	60	1.05 de	1.22 e	1.36 f	1.45 e	1.77 d	2.08 c	2.27 c	2.30 c	2.32 b	2.33 c
1000	40	2.41 ab	2.63 ab	2.73 b	2.82 b	2.85 ab	3.12 b	3.32 b	3.33 b	3.50 ab	3.36 b
	60	1.24 cd	1.41 de	1.70 e	1.86 d	2.12 cd	2.27 c	2.38 c	2.40 c	2.42 b	2.44 c
لنجان Lenjan											
0	40	6.20 b	6.24 c	6.30 cd	6.34 cd	6.44 bc	6.50 bc	6.56 bc	6.59 c	6.71 bc	6.87 bc
	60	4.50 e	4.64 e	4.75 f	5.04 f	4.97 e	5.25 d	5.30 d	5.37 d	5.49 a	5.59 d
500	40	6.50 b	6.47 bc	6.52 bc	6.63 bc	6.70 b	6.81 b	6.84 b	6.93 bc	7.00 bc	7.13 b
	60	5.30 d	5.71 d	5.86 e	5.91 e	5.98 d	6.14 c	6.33 c	6.44 c	6.51 c	6.60 c
1000	40	6.52 b	6.67 b	6.72 b	6.79 b	6.81 b	6.90 b	6.96 b	7.10 b	7.16 b	7.23 b
	60	5.67 c	5.71 d	5.77 e	5.96 e	6.33 d	6.46 c	6.57 bc	6.74 bc	6.82 bc	6.85 bc
ابراهیم آباد Ebrahim Abad											
0	40	12.10 b	12.11 b	12.13 b	12.17 b	12.08 b	12.22 b	12.27 b	12.35 b	12.38 b	12.45 b
	60	8.00 e	8.10 e	8.08 e	8.12 e	8.15 e	8.18 e	8.22 e	8.26 e	8.31 e	8.35 e
500	40	12.17 ab	12.20 ab	12.23 b	12.27 b	12.30 ab	12.13 b	12.40 ab	12.40 ab	12.50 ab	12.55 ab
	60	8.16 de	8.18 de	8.22 de	8.25 de	8.28 de	8.32 de	8.38 de	8.42 de	8.46 de	8.25 de
1000	40	12.32 a	12.36 a	12.39 a	12.43 a	12.45 a	12.49 a	12.52 a	12.55 a	12.60 a	12.65 a
	60	8.30 d	8.32 d	8.35 d	8.40 d	8.42 d	8.87 d	8.52 d	8.52 d	8.60 d	8.67 d
جدوشی Jadushi											
0	40	18.43 a	18.47 a	18.56 a	18.62 a	18.65 a	18.66 a	18.67 a	18.69 a	18.69 a	18.71 a
	60	13.55 b	13.64 b	13.72 b	13.80 b	13.84 b	13.86 b	13.89 b	13.92 b	13.94 b	13.97 b
500	40	18.66 a	18.68 a	18.70 a	18.75 a	18.80 a	18.81 a	18.83 a	18.87 a	18.92 a	19.00 a
	60	13.62 b	15.11 b	13.84 b	13.92 b	13.97 b	13.98 b	13.99 b	14.01 b	14.03 b	14.10 b
1000	40	18.61 a	18.71 a	18.66 a	18.70 a	18.71 a	18.72 a	18.74 a	18.75 a	18.75 a	18.80 a
	60	13.65 b	14.30 b	13.70 b	13.90 b	13.86 b	13.87 b	13.89 b	14.00 b	13.91 b	13.93 b

\* حروف مشابه در هر ستون و برای هر سری خاک به طور مجزا، نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد است.

\*Similar letters within each column and for each soil series separately indicate no significant difference at the 5% level.

### تأثیر مقادیر مختلف گوگرد در شرایط مختلف رطوبتی بر فسفر و سولفات قابل جذب خاک

نتایج نشان داد که با افزایش مقدار گوگرد مصرفی در هر دو محتوای رطوبتی ۴۰ و ۶۰ درصد رطوبت اشباع، غلظت فسفر قابل جذب خاک افزایش یافت ( $p < 0.05$ ) (جدول ۶). افزایش گوگرد معمولاً باعث افزایش فسفر محلول می‌شود، زیرا اکسایش گوگرد اسیدیته خاک را افزایش داده و حلالیت فسفر را بهبود می‌بخشد. بیشترین مقدار فسفر در تیمار ۱۰۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار و رطوبت ۴۰ درصد در خاک‌های غیر شور و با شوری کمتر مشاهده شد و خاک‌های با شوری زیاد (ابراهیم‌آباد و جدوشی) کمترین واکنش را به گوگرد نشان دادند (جدول ۵).

Ghaderi و همکاران (۲۰۱۹) و Kaplan و Orman (۱۹۹۸) نیز گزارش کردند که افزایش مقدار فسفر قابل جذب با کاربرد گوگرد، به کاهش pH خاک و آزادسازی فسفر از ترکیبات نامحلول نسبت داده می‌شود. در خاک بوشگان که شوری کمتری نسبت به خاک لنجان داشت، غلظت فسفر کمتر بود، این ممکن است بخاطر درصد بالای آهک در خاک بوشگان (۵۰ درصد) باشد. در خاک های آهکی، غلظت بالای یون کلسیم در محلول خاک با تبدیل یون‌های فسفات به صورت فسفات‌های مختلف کلسیم منجر به کاهش غلظت فسفر قابل جذب خاک می‌گردد که احتمالاً یکی از دلایل کاهش فسفر قابل جذب ناشی از همین عامل است (Babaei et al., 2012). غلظت فسفر قابل جذب در خاک‌های

افزایش pH در روزهای پایانی به دلیل خاصیت بافری خاک بر می‌گردد.

غیرشور (دره بید، کم سرخ و بوشگان) در طول انکوباسیون تا روز ۲۷۰ افزایش و سپس شروع به کاهش می‌کند که احتمالاً به

جدول ۶- مقایسه میانگین تأثیر مقادیر مختلف گوگرد در شرایط مختلف رطوبتی بر فسفر و سولفات محلول خاک

Table 6. Comparison of the mean effect of different sulfur levels under various moisture conditions on soil soluble phosphorus and sulfate.

سری خاک Soil Series	S (kg/ha)	SP (%)	Phosphorus (mg/kg)				Sulfate (mg/kg)		
			40 days	80 days	120 days	360 days	25 days	60 days	360 days
دره بید Dareh Bid	0	40	20.4 f	20.6 g	20.8 de	20.47 e	33 F	45 F	69 F
		60	20.3 g	20.5 h	20.6 e	20.60 e	26 F	37 F	54 F
	500	40	20.8 c	21.23 d	21.6 c	22.3 c	856 e	1056 e	1162 e
		60	20.4 fg	20.7 f	20.9 d	21.4 d	732 e	858 e	972 e
	100	40	22.0 a	22.8 a	23.50 a	24.5 a	2202 c	2823 c	3575 c
		60	20.6 e	21.5 c	22.20 b	23.1 b	1436 d	1746 d	2083 d
کم سرخ Kam Sorkh	0	40	12.7 c	12.8 cd	12.9 d	12.60 c	667 f	730 g	767 g
		60	12.2 e	12.4 e	12.4 g	12.3 d	655 g	666 h	678 h
	500	40	12.8 bc	12.9 c	13.1 c	12.8 b	1162 d	1455 d	1565 d
		60	12.2 e	12.3 e	12.6 f	12.5 c	1068 e	1246 f	1352 f
	100	40	13.1 a	13.4 a	13.7 a	13.4 a	1303 c	1593 c	1739 c
		60	12.7 c	12.91 c	13.1 c	12.8 b	1068 e	1306 e	1490 e
بوشگان Bushgan	0	40	3.2 c	3.5 e	3.4 d	3.3 cd	3890 g	3977 g	3604 h
		60	3.8 d	3.1 f	3.0 e	2.9 e	3776 h	3844 h	3796 c
	500	40	3.5 b	3.8 cd	3.7 bc	3.6 bc	4231 e	4350 e	4239 e
		60	3.2 c	3.5 e	3.3 d	3.2 de	4040 f	4231 f	4060 f
	100	40	3.9 a	4.6 a	4.5 a	3.4 a	4468 c	4760 c	4625 c
		60	3.6 b	3.9 bc	3.9 b	3.7 b	4371 d	4516 d	4450 d
لنجان Lenjan	0	40	13.2 c	13.1 cd	13.0 ab	13.0 ab	3718 f	3549 e	3518 e
		60	12.87 d	12.83 de	12.7 bc	12.6 bc	3537 g	3500 e	3070 f
	500	40	13.20 c	13.1 cd	13.0 ab	13.0 ab	6145 a	5920 b	5460 c
		60	12.83 d	12.7 e	12.5 c	12.5 c	5337 e	5312 d	5224 d
	100	40	13.70 a	13.57 a	13.4 a	13.2 a	5826 c	5660 c	5557 c
		60	13.40 bc	13.20 bc	13.1 ab	12.9 abc	5557 d	5293 d	5278 d
ابراهیم آباد Ebrahim Abad	0	40	4.57 a	4.47 a	4.30 a	4.23 a	5607 e	5500 e	5420 g
		60	4.03 a	3.92 b	3.87 a	3.77 a	5423 f	5401 f	5380 h
	500	40	4.60 a	4.43 ab	4.33 a	4.20 a	5841 b	5706 c	5620 c
		60	4.00 a	3.93 ab	3.83 a	3.70 a	5756 c	5705 c	5618 d
	100	40	4.6 a	4.40 ab	4.23 a	4.10 a	5920 a	5806 b	5718 b
		60	4.4 a	4.30 ab	4.10 a	4.03 a	5672 d	5620 d	5610 e
جنوشی Jadushi	0	40	2.3 c	2.3 c	2.3 b	2.2 b	5330 d	5250 d	5250 d
		60	2.2 d	2.2 d	2.2 c	2.1 c	5280 de	5220 d	5180 ef
	500	40	2.5 a	2.5 a	2.4 a	2.3 a	5572 b	5510 b	5430 b
		60	2.4 b	2.3 c	2.3 b	2.2 b	5239 e	5220 b	5130 f
	100	40	2.4 b	2.4 b	2.3 b	2.2 b	5686 a	5640 a	5610 a
		60	2.3 c	2.2 d	2.2 c	2.2 b	5385 c	5273 cd	5210 de

\* حروف مشابه در هر ستون و برای هر سری خاک به طور مجزا نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد است.

\*Similar letters within each column and for each soil series separately indicate no significant difference at the 5% level.

افزایش می‌دهد. اثرات مفید کاربرد گوگرد در افزایش قابلیت جذب عناصر غذایی کم‌مصرف از جمله آهن و روی توسط Abdou و همکاران (۲۰۱۱) و Besharati و همکاران، (۲۰۱۷) نیز تأیید شده است.

همانند نتایج فسفر قابل جذب، مقدار سولفات محلول خاک با کاربرد گوگرد در شرایط مختلف رطوبتی به طور معنی‌داری افزایش یافت (جدول ۶). این افزایش را می‌توان عمدتاً به مکانیسم اکسایش زیستی گوگرد عنصری نسبت داد. در این فرایند، باکتری‌های اکسید کننده گوگرد (مانند تیوباسیلوس) با استفاده از گوگرد به‌عنوان منبع انرژی، آن را طی یک سری واکنش‌های آنزیمی به سولفات تبدیل می‌کنند (Chaudhary et al., 2023).

بیش‌ترین مقدار سولفات محلول در تیمار ۱۰۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار و تحت شرایط رطوبتی ۴۰ درصد اشباع مشاهده شد. به نظر می‌رسد این شرایط رطوبتی (۴۰ درصد) نقطه بهینه‌ای را فراهم می‌کند که در آن تبادل گازی (تهویه) و در نتیجه دسترسی به اکسیژن (که برای متابولیسم باکتری‌های هوازی اکسید کننده گوگرد ضروری است) در حداکثر خود قرار دارد (Zhao et al., 2022). از سوی دیگر، افزایش رطوبت به ۶۰ درصد اشباع، با کاهش نفوذپذیری اکسیژن در محیط خاک، منجر به محدودیت تهویه و در نتیجه مهار فعالیت این جامعه میکروبی و نرخ اکسایش می‌شود (Germida and Janzen, 1993). این الگو که در مطالعاتی با شرایط مشابه نیز گزارش شده است (قادری و همکاران، ۱۳۹۶; Orman and Kaplan, 2009). علاوه بر این، اسیدسولفوریک تولید شده از اکسایش گوگرد، با انحلال ترکیبات معدنی حاوی سولفات در خاک، به افزایش بیشتر غلظت این آنیون در محلول خاک کمک می‌کند (El-Kholy et al., 2014).

### تأثیر مقادیر مختلف گوگرد در شرایط مختلف رطوبتی بر آهن و روی قابل جذب خاک

نتایج نشان داد با افزایش سطح مصرف گوگرد در شرایط ۴۰ و ۶۰ درصد رطوبت اشباع، آهن و روی قابل جذب خاک افزایش یافت ( $p < 0.05$ ). افزایش غلظت گوگرد به‌طور کلی باعث افزایش غلظت آهن و روی قابل جذب می‌شود، زیرا اکسایش گوگرد pH خاک را کاهش داده و حلالیت این عناصر را بهبود می‌بخشد. بیشترین تأثیر در تیمار ۱۰۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار و رطوبت ۴۰ درصد و کمترین تأثیر در تیمار شاهد (بدون گوگرد) و رطوبت ۶۰ درصد مشاهده شد. خاک‌های با بافت سنگین‌تر و غیر شور مانند دره بید دارای بیشترین غلظت آهن و روی بودند (جدول ۷) که یکی از دلایل آن اکسایش بیشتر گوگرد در این خاک به دلیل شوری پایین و دلیل دیگر pH اولیه پایین‌تر نسبت به بقیه خاک‌هاست. در حالی که در خاک‌های بسیار شور (مانند ابراهیم‌آباد و جدوشی) غلظت آهن و روی کاهش یافت. Kalbasi و همکاران (۱۹۸۸) و Safaa و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند که اکسایش گوگرد در اثر کاربرد آن در خاک با تولید اسیدسولفوریک، pH و غلظت بی‌کربنات را کاهش و مقدار آهن و روی قابل جذب را

جدول ۷- مقایسه میانگین تأثیر مقادیر مختلف گوگرد در شرایط مختلف رطوبتی بر آهن و روی قابل جذب خاک

Table 7. Comparison of the mean effect of different sulfur levels under various moisture conditions on soil available Fe and Zn.

سری خاک Soil Series	S (kg/ha)	SP (%)	Fe (mg/kg)				Zn (mg/kg)			
			40 days	80 days	120 days	360 days	40 days	80 days	120 days	360 days
دره بید Dareh Bid	0	40	3.03 d	3.06 de	3.08 e	3.06 de	0.51 abcd	0.53 cd	0.57 bc	0.53 bcd
		60	2.96 e	3.02 e	3.05 e	3.01 e	0.46 d	0.49 d	0.54 c	0.56 bcd
	500	40	3.14 b	3.18 bc	3.24 c	3.18 b	0.54 ab	0.62 a	0.68 a	0.59 ab
		60	3.08 cd	3.10 d	3.15 d	3.12 cd	0.48 bcd	0.52 cd	0.55 c	0.51 d
	1000	40	3.09 bc	3.17 c	3.28 bc	3.18 b	0.53 abc	0.60 ab	0.67 a	0.58 abc
		60	3.05 cd	3.01 d	3.28 d	3.13 bc	0.47 cd	0.52 cd	0.56 bc	0.52 cd
کم سرخ Kam Sorkh	0	40	3.03 d	3.06 de	3.08 e	3.06 de	0.51 abcd	0.53 cd	0.57 bc	0.53 bcd
		60	2.96 e	3.02 e	3.05 e	3.01 e	0.46 d	0.49 d	0.54 c	0.56 bcd
	500	40	3.14 b	3.18 bc	3.24 c	3.18 b	0.54 ab	0.62 a	0.68 a	0.59 ab
		60	3.08 cd	3.10 d	3.15 d	3.12 cd	0.48 bcd	0.52 cd	0.55 c	0.51 d
	1000	40	3.09 bc	3.17 c	3.28 bc	3.18 b	0.53 abc	0.60 ab	0.67 a	0.58 abc
		60	3.05 cd	3.01 d	3.28 d	3.13 bc	0.47 cd	0.52 cd	0.56 bc	0.52 cd
بوشگان Bushgan	0	40	7.00 d	7.31 c	7.22 d	7.15 b	0.61 cd	0.59 cde	0.57 cde	0.56 cd
		60	6.30 e	6.51 d	6.31 e	6.21 c	0.55 e	0.55 e	0.53 e	0.53 d
	500	40	7.31 bc	7.69 b	7.57 bc	7.33 b	0.64 cd	0.62 cd	0.61 cd	0.60 c
		60	6.59 e	6.67 d	6.55 e	6.30 c	0.59 de	0.57 de	0.55 de	0.54 cd
	1000	40	7.49 b	7.89 b	7.74 b	7.57 ab	0.72 b	0.71 b	0.70 b	0.68 b
		60	7.08 cd	7.37 c	7.33 cd	7.30 b	0.65 c	0.63 c	0.61 c	0.59 c
لنجان Lenjan	0	40	6.28 a	6.25 a	6.19 a	5.83 d	0.61 a	0.59 a	0.51 ab	0.42 ab
		60	5.99 b	5.89 c	5.82 c	5.64 e	0.57 a	0.51 ab	0.43 ab	0.36 b
	500	40	6.27 a	6.23 a	6.18 a	6.15 a	0.59 a	0.57 ab	0.52 ab	0.43 a
		60	6.18 ab	6.17 ab	6.15 ab	6.11 ab	0.57 a	0.55 ab	0.45 ab	0.37 b
	1000	40	6.25 a	6.22 a	6.19 a	6.07 b	0.58 a	0.58 a	0.55 a	0.47 a
		60	6.12 b	6.10 b	6.02 b	5.90 c	0.57 a	0.51 b	0.50 ab	0.37 b
ابراهیم آباد Ebrahim Abad	0	40	4.97 a	4.89 a	4.83 a	4.71 a	0.56 a	0.54 a	0.52 a	0.51 b
		60	4.00 d	3.93 c	3.87 c	3.75 c	0.50 ab	0.47 b	0.45 a	0.43 a
	500	40	4.72 ab	4.63 ab	4.56 ab	4.51 ab	0.55 a	0.54 a	0.51 a	0.48 bc
		60	4.50 bc	4.43 abc	4.38 abc	4.29 abc	0.51 ab	0.49 ab	0.47 a	0.45 bc
	1000	40	4.59 abc	4.47 abc	4.31 abc	4.27 abc	0.54 a	0.53 a	0.50 a	0.46 bc
		60	4.24 cd	4.03 c	3.97 bc	3.84 c	0.51 ab	0.49 ab	0.46 a	0.44 c
جدوشی Jadushi	0	40	1.01 a	1.00 a	0.98 a	0.90 a	0.70 a	0.65 a	0.61 a	0.58 a
		60	0.90 bc	0.88 bc	0.84 cd	0.80 bc	0.75 a	0.66 a	0.60 a	0.57 a
	500	40	0.98 ab	0.95 ab	0.94 ab	0.84 ab	0.74 a	0.66 a	0.62 a	0.60 a
		60	0.79 de	0.77 de	0.76 de	0.71 cd	0.77 a	0.65 a	0.60 a	0.58 a
	1000	40	0.93 bc	0.92 bc	0.89 bc	0.80 b	0.70 a	0.61 a	0.56 a	0.55 a
		60	0.79 de	0.75 de	0.74 e	0.71 cd	0.77 a	0.60 a	0.55 a	0.54 a

\* حروف مشابه در هر ستون و برای هر سری خاک به طور مجزا، نشان دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد است.

\*Similar letters within each column and for each soil series separately indicate no significant difference at the 5% level.

## نتیجه‌گیری

پارادوکس ظاهری (اکسایش کمتر در دوز بالاتر) را می‌توان به مکانیسم‌های بازدارنده در سطوح بالای گوگرد مانند کاهش pH، افزایش استرس اسمزی ناشی از تجمع املاح و احتمال تشکیل لایه‌ای از مواد حد واسط محدودکننده برای دسترسی میکروبی به ذرات گوگرد نسبت داد. یافته‌ها بر اهمیت مدیریت توأم رطوبت (در حد ظرفیت مزرعه ۴۰~ درصد اشباع) و شوری خاک برای دستیابی به حداکثر کارایی گوگرد تأکید می‌کند. بر این اساس، توصیه می‌شود مطالعات آینده به بررسی دینامیک جمعیت میکروبی و بیان ژن‌های درگیر در اکسایش گوگرد (مانند Sox genes) در پاسخ به تنش شوری و سطوح مختلف گوگرد بپردازند. این کار می‌تواند درک عمیق‌تری از مکانیسم‌های مولکولی (بازدارندگی) در شرایط شور و راه‌های غلبه بر آن را فراهم کند.

این مطالعه به وضوح نشان داد که واکنش خاک به کاربرد گوگرد به شدت تحت تأثیر شوری ذاتی خاک، سطح رطوبت و مقدار گوگرد مصرفی قرار دارد. به‌طور کلی، خاک‌های غیر شور و کم‌شور (با شوری کمتر از ۸ dS/m) به دلیل عدم وجود استرس اسمزی و سمیت یونی، پاسخ بسیار بهتری به اصلاح گوگردی نشان دادند. از نظر مکانیسمی، بهترین نتایج در بهبود ویژگی‌های شیمیایی (کاهش pH و افزایش قابل توجه غلظت عناصر غذایی) در تیمار با بالاترین دوز گوگرد (۱۰۰۰ کیلوگرم در هکتار) حاصل شد، چرا که این مقدار گوگرد، اسیدسولفوریک کافی برای غلبه بر ظرفیت بافری خاک‌های مورد مطالعه و انحلال ترکیبات معدنی تولید کرد. در مقابل، بیشترین نرخ اکسایش گوگرد در تیمار ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار و تحت رطوبت ۴۰ درصد اشباع ثبت شد. این

## References



- Abdel-Fattah, A., Rasheed, M. A., & Shafei, A. M. (2005). Phosphorus availability as influenced by different application rates of elemental sulfur to soils. *Egyptian Journal of Soil Science*, 45(2), 199–208. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20073105198>
- Abdou, A., Soaud, A. A., Al Darwish, F. H., Saleh, M. E., El-Tarabily, K. A., Sofian-Azirun, M., & Motior, R. M. (2011). Effects of elemental sulfur, phosphorus, micronutrients and Paracoccus versutus on nutrient availability of calcareous soils. *Australian Journal of Crop Science*, 5(5), 554–561. <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.280328348003505>
- Allison, L. E., & Moodie, C. D. (1965). Carbonates. In C. A. Black (Ed.), *Methods of Soil Analysis*. Part 2. Chemical and Microbiological Properties (pp. 1379–1398). Agronomy Monograph No. 9, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America.
- Babaei, P., Golchin, A., Besharati, H., & Afzali, M. (2012). Effect of microbial sulfur fertilizer on nutrient uptake and yield of soybean in a calcareous soil. *Iranian Journal of Soil Research*, 26(2), 145–151. <https://doi.org/10.22092/ijsr.2012.126366> (In Persian)
- Bawer, C. A., Reitemeier, R. F., & Fireman, M. (1952). Exchangeable cation analysis of saline and alkali soil. *Soil Science*, 73(4), 251–261. <https://doi.org/10.1097/00010694-195204000-00004>
- Besharati, H., Khosravi, H., Mostashari, M., Mirzashahi, K., Ghaderi, J., & Zabihi, H. (2017). Effect of Thiobacillus, sulfur and phosphate on growth indices of maize in some regions of Iran. *Scientific and Research Journal of Applied Soil Research*, 4(1), 103–112. <https://doi.org/10.29252/asr.4.1.103> (In Persian)
- Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy Journal*, 54(5), 464–465. <https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>
- Bremner, J. M. (1996). Nitrogen—Total. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis*. Part 3—Chemical Methods (pp. 1085–1121). Soil Science Society of America Inc. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c37>
- Chaudhary, S., Sindhu, S. S., Dhanker, R., & Kumari, A. (2023). Microbes-mediated sulphur cycling in soil: Impact on soil fertility, crop production and environmental sustainability. *Microbiological Research*, 271, 127340. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127340>
- Chesnin, L., & Yien, C. H. (1951). Turbidimetric determination of available sulfates. *Soil Science Society of America Proceedings*, 15, 149–151.
- de Souza Freitas, W. E., de Oliveira, A. B., Mesquita, R. O., de Carvalho, H. H., Prisco, J. T., & Gomes-Filho, E. (2019). Sulfur-induced salinity tolerance in lettuce is due to a better P and K uptake, lower Na/K ratio and an efficient antioxidative defense system. *Scientia Horticulturae*, 257, 108764. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108764>
- Degryse, F., Baird, R., Andelkovic, I., & McLaughlin, M. J. (2021). Long-term fate of fertilizer sulfate-and elemental S in co-granulated fertilizers. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*,

- 120, 31–48. <https://doi.org/10.1007/s10705-020-10111-1>
13. El-Kholy, A. M., Ali, O. M., El-Sikhry, E. M., & Mohamed, A. I. (2013). Effect of sulfur application on the availability of some nutrients in Egyptian soils. *Egyptian Journal of Soil Science*, 53(3), 361–377.
14. Germida, J. J., & Janzen, H. H. (1993). Factors affecting the oxidation of elemental sulfur in soils. *Fertilizer Research*, 35, 101–114. <https://doi.org/10.1007/BF00748735>
15. Ghaderi, J., Malakouti, M. J., Khavazi, K., & Davoodi, M. H. (2019). Sulfur oxidation under different moisture conditions and its effect on some chemical soil characteristics. *Journal of Soil Biology*, 6(2), 125–136. <https://doi.org/10.22092/sbj.2019.118567> (In Persian)
16. Hammerschmidt, T., Holatko, J., Bytesnikova, Z., Skarpa, P., Richtera, L., Kintl, A., Pekarkova, J., Kucerik, J., Jaskulska, I., Radziemska, M. and Valova, R. (2024). The impact of single and combined amendment of elemental sulphur and graphene oxide on soil microbiome and nutrient transformation activities. *Heliyon*, 10(19). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38439>
17. Hashemimajd, K., Mohamadi Farani, T., & Jamaati, S. (2012). Effect of elemental sulfur and compost on pH, electrical conductivity and phosphorus availability of one clay soil. *African Journal of Biotechnology*, 11(6), 1425–1432. <https://doi.org/10.5897/AJB11.2800>
18. Islam, S. N. U., Arshad, M., Ahmad, S., & Asgher, M. (2024). *Role of sulfur and its crosstalk with phytohormones under abiotic stress in plants*. In M. A. Ahanger, J. A. Bhat, P. Ahmad, & R. John (Eds.), *Improving Stress Resilience in Plants* (pp. 225–247). Academic Press, Elsevier Inc., USA. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18927-2.00010-8>
19. Janzen, H. H., & Bettany, J. R. (1987). Oxidation of elemental sulfur under field conditions in central Saskatchewan. *Canadian Journal of Soil Science*, 67, 609–618. <https://doi.org/10.4141/cjss87-057>
20. Kalbasi, M., Filsoof, F., & Rezai-Nejad, Y. (1988). Effect of sulfur treatments on yield and uptake of Fe, Zn and Mn by corn, sorghum and soybeans. *Journal of Plant Nutrition*, 11, 1353–1360. <https://doi.org/10.1080/01904168809363892>
21. Kaplan, M., & Orman, S. (1998). Effect of elemental sulfur and sulfur containing waste in a calcareous soil in Turkey. *Journal of Plant Nutrition*, 21, 1655–1665. <https://doi.org/10.1080/01904169809365511>
22. Kasraian, A., Karimian, N., & Pazira, E. (2012). Effect of sulfur application on spinach phytoremediation process of cadmium in contaminated calcareous soils. *Journal of Water and Wastewater*, 27(2), 52–58. (Text in Persian)
23. Knudsen, D., Peterson, G.A., and Pratt P.F. (1982). Lithium, sodium, and potassium. Pp. 225–246. In Page A.L., R.H. Miller, and D.R. Keeney (eds). *Method of Soil Analysis*. Part2. Chemical and Microbiological Properties. Soil Science Society of America. Book Ser. 5. Madison, WI, USA.
24. Lee, A., Boswell, C. C., & Watkinson, J. H. (1988). Effect of particle size on the oxidation of elemental sulphur, thiobacilli numbers, soil sulphate, and its availability to pasture. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 31(2), 179–186.
25. Li, Q., Gao, Y., & Yang, A. (2020). Sulfur homeostasis in plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 23, 8926. <https://doi.org/10.3390/ijms21238926>
26. Lindsay, W. L., & Norvell, W. A. (1978). Development of a DTPA test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42, 421–428. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>
27. Modaihsh, A. S., Al-Mustafa, W. A., & Metwally, A. I. (1989). Effect of elemental sulfur on chemical changes and nutrient availability in calcareous soils. *Journal of Plant and Soil*, 16, 95–101.
28. Olsen, S. R., Cole, C. V., Watanabe, F. S., & Dean, L. A. (1954). *Estimation of available phosphorus in soil by extraction with sodium bicarbonate* (USDA Circular 939). US Government Printing Office.
29. Orman, S., & Hüseyin, O. (2012). Effects of sulfur and zinc applications on growth and nutrition of bread wheat in calcareous clay loam soil. *African Journal of Biotechnology*, 11(13), 3080–3086. <https://doi.org/10.5897/AJB11.2701>
30. Orman, S., & Kaplan, M. (2009). Determination of sulfur contents in tomato grown in greenhouses in West Mediterranean Region, Turkey. *Asian Journal of Chemistry*, 21(1), 484–498. <http://www.asianjournalofchemistry.com/>
31. Safaa, M. M., Khaled, S. M., & Hanan, S. (2013). Effect of elemental sulfur on solubility of soil nutrients and soil heavy metals and their uptake by maize plants. *Journal of American Science*, 9(12), 19–24. [http://www.jofamericanscience.org/journals/am-sci/am0912/004\\_20999am0912\\_19\\_24](http://www.jofamericanscience.org/journals/am-sci/am0912/004_20999am0912_19_24)
32. Shahbazi, K., Marzi, M., Mohammadi, M. H., Asadi, H., Fathi Gardelidani, A., Sadat Hashemi Nasab Zavareh, K., Tolouei, R., Beheshti, M., Avizhan, A., & Cheraghi, M. (2024). Methods of soil analysis, sampling, chemical and physical methods. Soil and Water Research Institute. (In Persian)

33. Slaton, N. A. (1998). *The influence of elemental sulfur amendments on soil chemical properties and rice growth* (Doctoral dissertation, University of Arkansas, Arkansas, USA).
34. Soil and Water Research Institute, S. (2014). *Fundamental and principal report of the Soil and Water Research Institute strategic program in 2014*. Soil and Water Research Institute, Tehran. (in Persian).
35. Tisdale, S. L., & Nelson, W. L. (1958). *Soil fertility and fertilizers* (2nd ed.). McMillan Publishing Company, New York, USA.
36. Turan, M. A., Taban, S., Katkat, A. V., & Kucukyumuk, Z. (2013). The evaluation of the elemental sulfur and gypsum effect on soil pH, EC, SO<sub>4</sub>-S and available Mn content. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 11(1), 572–575.
37. Yadav, B., Jogawat, A., Lal, S. K., Lakra, N., Mehta, S., Shabek, N., & Narayan, O. P. (2021). Plant mineral transport systems and the potential for crop improvement. *Planta*, 253, 45. <https://doi.org/10.1007/s00425-020-03533-3>
38. Zhao, C., Wang, J., Zang, F., Tang, W., Dong, G., & Nan, Z. (2022). Water content and communities of sulfur-oxidizing bacteria affect elemental sulfur oxidation in silty and sandy loam soils. *European Journal of Soil Biology*, 111, 103419. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2022.103419>



## Physiological and Nutritional Responses of *Citrus unshiu* cv. Miyagawa on Sour Orange (*Citrus aurantium* L.) in Mazandran Calcareous Soils of Mazandaran province

Ali Asadi kangarshahi <sup>a\*</sup> , and Negin Akhlaghi Amiri <sup>a</sup> 

<sup>a</sup> Mazandaran Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Mazandaran, Iran.

### Article Info

#### Article Type

Research Article

#### Received

September 20, 2025

#### Revised

December 12, 2025

#### Accepted

December 13, 2025

#### Published online

December 20, 2025

#### Keywords

Calcium carbonate, citrus, leaf yellowing (chlorosis), nutrients, rootstock.

\*Corresponding author's email

[kangarshahi@gmail.com](mailto:kangarshahi@gmail.com)

### Extended Abstract

**Background and Objectives:** Some of the physical and chemical characteristics of the soils of Mazandaran Province, especially clay content from north to south and lime (calcium carbonate) content from west to east, exhibit the greatest variation (clay: 3–40% and lime: 0–45%). Based on research and field results, Swingle citrumelo (*Grapefruit* and *Trifoliata orange*) is recommended for low-lime soils; C-35 (*Ruby Blood orange* and *P. trifoliata*), Carrizo citrange (*Citrus sinensis* Osb. and *Poncirus trifoliata* L. Raf.), and Troyer citrange (*C. sinensis* and *P. trifoliata* L.) are suitable for low- to medium-lime soils with light texture. Gou Tou (*Citrus aurantium* L. var. *Gou Tou*) has relative tolerance to lime but shows chlorosis symptoms in high and very high-lime soils. Smooth Flat Seville (*Citrus* spp., hybrid of uncertain origin) is tolerant to soil lime but shows early deterioration in some soils. Therefore, for medium-, high-, and very high-lime soils of eastern Mazandaran, Sour Orange (*C. aurantium* L.) rootstock is the only desirable and available option for orchards, making it necessary to understand its response to the region's soils for field guidance and management. Establishing and re-establishing citrus orchards in the region's soils requires this knowledge. For this purpose, this study was conducted for the first time in the country to evaluate the nutritional and physiological responses of *Citrus unshiu* cv. Miyagawa on Sour Orange rootstock in calcareous soils of eastern Mazandaran.

**Methodology:** According to the soil map and soil reports, seven soil samples were selected with different textures (sandy loam to clay) and calcium carbonate (2–45%). Thirty kilograms of soil from the selected soil samples were poured into plastic pots. Then, *Citrus unshiu* cv. Miyagawa seedlings on Sour Orange rootstock were planted in each soil. The experiment was conducted for two years in pots in a randomized complete block design with seven soils in four replications, totaling 28 pots. Plant responses included dry weight, chlorosis rate, fluorescence index (Fv/Fm), chlorophyll, and nutrient concentrations in leaves and roots. Finally, all the obtained data were analyzed using SPSS software, and the means of the studied parameters were compared using Duncan's multiple range test.

**Results:** The results of this study showed that the physical and chemical properties of the soil have a great influence on the nutritional and physiological responses of *Citrus unshiu* cv. Miyagawa on Sour Orange rootstock. The results showed that the highest and lowest average dry weight of aerial parts and roots were obtained from soils with clay texture and total lime of 30% and sandy loam soils with lime of 40%, respectively. There was a significant difference in the chlorosis rate of the leaves of seedlings on this rootstock in different soils. The average concentrations of Fe, Mn, and Zn in the roots were 12.48, 6.14, and 3.19 times, respectively, higher than the average concentrations in the leaves. In general, among the essential elements, Mg and S had the highest and lowest translocation factors (TFs) from the root to the leaves, respectively, while active and total Fe showed the highest and lowest TFs, respectively. The P, S, Fe, Mn, Zn, and Cu translocation factors were less than one, indicating that these elements are less mobile and accumulate in the roots. The leaf chlorosis index of *Citrus unshiu* cv. Miyagawa on Sour Orange rootstock in soils with low and high lime did not differ significantly. Additionally, increasing active lime did not have a significant effect on the concentration of active Fe or the chlorosis rate of seedlings on this rootstock.

**Conclusion:** According to the results of this study, Sour Orange rootstock is tolerant to soil lime, and lime is not a limiting factor for it. Therefore, it is recommended for calcareous soils of the eastern Mazandaran region, especially in soils with heavy texture and high lime content. However, its use in light-textured soils and in soils susceptible to manganese deficiency (where there is a possibility of manganese deficiency symptoms) is not recommended, because the results of this study showed that in these soils, its vegetative growth is severely reduced, and soil texture (especially light textures such as sandy loam) is one of the limiting factors for this rootstock.

---

**Cite this article:** Asadi Kangarshahi, A., Akhlaghi Amiri, N., 2025. Physiological and Nutritional Responses of *Citrus unshiu* cv. Miyagawa on Sour Orange (*Citrus aurantium* L.) in Mazandran Calcareous Soils of Mazandaran province. *Journal of Soil Research*, 39 (3), pp 321-344.



**DOI:** [10.22092/IJSR.2025.370719.788](https://doi.org/10.22092/IJSR.2025.370719.788)

**Publisher:** Soil Science Society of Iran

---



## پاسخ‌های تغذیه‌ای و فیزیولوژیکی نارنگی انشو میاگوا (*Citrus unshiu* cv. Miyagawa) با پایه نارنج (*Citrus aurantium* L.) به خاک‌های آهکی در استان مازندران

علی اسدی کنگرشاهی<sup>۱\*</sup> و نگین اخلاقی امیری<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مازندران، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۹	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۲۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۲	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۲۹	
واژه‌های کلیدی	
پایه،	
زرد برگی (کلروز)،	
عناصر غذایی،	
کربنات کلسیم،	
مرکبات	

\* ایمیل نویسنده مسئول

[kangarshahi@gmail.com](mailto:kangarshahi@gmail.com)

استاد: اسدی کنگرشاهی، ع، اخلاقی امیری، ن، ۱۴۰۴. پاسخ‌های تغذیه‌ای و فیزیولوژیکی نارنگی انشو با پایه نارنج به خاک‌های آهکی. مقاله

پژوهشی، نشریه پژوهش‌های خاک، (۳) ۳۹، ص ۳۴۴-۳۲۱.

DOI:10.22092/IJSR.2025.370719.788



## مقدمه

مطالعات انجام شده در منطقه و همچنین برخی گزارش‌های علمی نشان داده‌اند که این پایه‌ها در خاک‌های با آهک زیاد، اغلب دچار کلروز ناشی از آهک، کاهش رشد، خشکیدگی سرشاخه‌ها و زوال می‌شوند (Asadi Kangarshahi, 2018; Asadi Kangarshahi and Akhlaghi Amiri, 2017, 2020 & Louzada et al., 2008, 2022). نتایج پژوهشی در مورد پایه سیتروملو نشان داد که بین مقدار آهک فعال خاک و غلظت آهن فعال برگ، رابطه خطی معنی‌داری وجود دارد و با افزایش آهک فعال خاک غلظت آهن فعال برگ کاهش می‌یابد و این پایه حساس به خاک‌های آهکی گزارش شده است (Asadi Kangarshahi and Akhlaghi Amiri, 2017). نتایج پژوهشی درختان نارنگی انشو با پایه کاریزوسیترنج نشان داد که این پایه در خاک‌های آهکی با بافت متوسط یا سنگین و آهک بیشتر از ۱۴ درصد یا آهک فعال بیشتر از ۵ درصد علائم زرد برگی نشان دادند اما در خاک‌های آهکی با بافت سبک، این پایه مقدار آهک کل بسیار بیشتری را نیز به خوبی تحمل می‌کند؛ بنابراین استفاده از این پایه در خاک‌های با بافت متوسط و سنگین و آهک کل بیشتر از ۱۴ درصد توصیه نمی‌شود؛ اما در خاک‌های با بافت سبک، استفاده از این پایه در خاک‌های با آهک ۴۰ درصد نیز امکان‌پذیر است (Asadi Kangarshahi and Akhlaghi Amiri, 2022).

نتایج پژوهشی درختان نارنگی انشو با پایه گوتو نشان داد که این پایه نسبتاً متحمل به آهک خاک است و به باغداران توصیه می‌شود در خاک‌های آهکی (خاک‌های با آهک کم، متوسط و زیاد) از این پایه به‌عنوان پایه جایگزین برای نارنج در احداث باغ استفاده کنند. اما در خاک‌های آهکی (با آهک خیلی زیاد) و همچنین در خاک‌های مستعد کمبود منگنز (که احتمال ظهور علائم کمبود منگنز وجود دارد) استفاده از این پایه توصیه نمی‌شود (Asadi Kangarshahi and Akhlaghi Amiri, 2025). همچنین نتایج پژوهش‌های انجام شده در مورد پایه اسموت فلت سویل نشان داد که درختان نارنگی انشو با پایه اسموت فلت سویل به‌خوبی در خاک‌های آهکی رشد کردند و علائم کلروز در خاک‌های با آهک مختلف نداشتند. شاخص زرد برگی نهال‌ها در خاک‌های مختلف تفاوت معنی‌داری باهم نداشتند این پایه متحمل به آهک خاک است و به باغداران توصیه می‌شود در خاک‌های آهکی (به‌ویژه خاک‌های با آهک متوسط و زیاد) از این پایه به‌عنوان پایه جایگزین برای نارنج در احداث باغ استفاده

کربنات کلسیم در بیش از ۳۰ درصد اراضی جهان وجود دارد (Loeppert et al., 1994). مقدار کربنات کلسیم خاک، یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های شیمیایی خاک است که در کاهش قابلیت استفاده آهن و شدت کلروز درختان میوه مؤثر است. اغلب خاک‌های ایران نیز آهکی هستند (Tehrani et al., 2011). در استان مازندران مقدار کربنات کلسیم خاک باغ‌های این منطقه از میانه به‌طرف شرق به‌تدریج افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که مقدار کربنات کلسیم خاک‌ها در شرق ساری و نکا به بیش از ۴۰ درصد می‌رسد (Asadi Kangarshahi and Akhlaghi Amiri, 2015). نارنج<sup>۱</sup> یکی از پایه‌هایی است که تحمل و سازگاری خوبی به خاک‌های آهکی دارد و به‌طور گسترده در حوضه مدیریتانه استفاده می‌شود (Incesu et al., 2016). از طرفی، پایه غالب باغ‌های مرکبات مازندران نارنج است (Khoei, 1991). بیشتر ارقام مرکباتی که روی نارنج پیوند می‌شوند میوه‌های باکیفیت مناسب دارند اما این پایه حساس به بیماری ویروسی تریستیزا است (Cambra et al., 2000; Rahimian et al., 2000). در مقابل پایه‌های سه برگچه‌ای و هیبریدهای آن‌ها مانند پونسیروس، کاریزوسیترنج، ترویرسیترنج، سی ۳۵، سوینگل سیتروملو و ... نسبت به این بیماری متحمل هستند، اما این پایه‌ها معمولاً به آهک زیاد در خاک حساس هستند و احتمال کلروز در خاک‌های آهکی دارند (Asadi Kangarshahi and Akhlaghi Amiri, 2018; Continella et al., 2023). گزارش ارزیابی برخی ژنوتیپ‌های مرکبات (پایه) به‌منظور تعیین تحمل نسبی به کلروز آهن ناشی از آهک نشان داده است که نارنج و کلتوپاترا ماندارین بیشترین تحمل به آهک خاک دارند، ترویرسیترنج، کاریزوسیترنج و سی ۳۵ تحمل متوسطی دارند و در مقابل سوینگل سیتروملو، ولکامیرانا و پونسیروس حساس به آهک خاک هستند (Incesu et al., 2016; Bowman and Joubert, 2020). ارزیابی چندین پایه برای نارنگی کلماتین در کشور مصر نشان داده است که کاریزوسیترنج مناسب‌ترین پایه برای آن در خاک‌های اسیدی است در مقابل گوتو پایه مناسبی برای کلماتین نیست (Hussain et al., 2013, 2023).

تحمل درختان مرکبات به آهک خاک و کلروز، بیشتر به پایه آن‌ها بستگی دارد. پایه‌های ترویرسیترنج، کاریزوسیترنج، سی ۳۵، سوینگل سیتروملو به صنعت مرکبات استان مازندران وارد شده‌اند و در این مناطق گسترش و ترویج شده‌اند. درحالی‌که

<sup>1</sup> Sour Orange

Asadi Kangarshahi and ) درصد ۴۵ صفر تا بیشتر از ۴۵ درصد (Asadi Kangarshahi and Akhlaghi Amiri, 2018; Izadpanah, 1976). براساس نتایج پژوهشی و میدانی، سیتروملو برای خاک‌های با آهک کم، سیترنج‌ها (سی ۳۵)، کاریزو سیترنج، ترویرسیترنج برای خاک‌های با آهک کم تا متوسط با بافت سبک) توصیه می‌شوند. گوتو تحمل نسبی به آهک دارد و در خاک‌های با آهک زیاد و خیلی زیاد علائم کلروز دارد، اسموت فلت سویل متحمل به آهک خاک است اما در برخی خاک‌ها زوال زود هنگام دارد (در دست بررسی است) و این دو پایه به دلایلی هنوز مورد استقبال باغداران قرار نگرفته است (Asadi Kangarshahi and Akhlaghi Amiri, 2025). بنابراین برای خاک‌های با آهک متوسط، زیاد و خیلی زیاد منطقه شرق مازندران، پایه نارنج تنها گزینه مطلوب و در دسترس باغداران است، لذا شناخت پاسخ آن به خاک‌های منطقه برای راهنمایی و مدیریت میدانی احداث و بازسازی باغ‌های مرکبات در خاک‌های منطقه ضروری است. بدین منظور این پژوهش برای ارزیابی پاسخ‌های تغذیه‌ای و فیزیولوژیکی نارنگی انشو با پایه نارنج در خاک‌های آهکی منطقه شرق مازندران انجام شد.

### مواد و روش‌ها

با توجه به نقشه خاک، گزارش‌های خاکشناسی و همچنین مطالعات انجام‌شده در باغ‌های شرق مازندران، هفت نمونه خاک به‌گونه‌ای انتخاب گردید که دارای بافت متفاوت و دامنه وسیعی از کربنات کلسیم (از ۲ تا ۴۵ درصد) بودند و همچنین منطقه وسیعی از نظر جغرافیایی (نواحی عمده کشت مرکبات) در برداشتند. خاک‌های آزمایشی از باغ‌های مناطق مختلف شرق مازندران (بابل، قائم‌شهر، ساری و نکا) جمع‌آوری شدند و پس از خشک‌کردن در هوا، کوبیدن و عبور از الک دو میلی‌متری، برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها از جمله کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون با اسید (Bashour and Sayegh, 2007)، کربنات کلسیم فعال به روش تیتراسیون با پرمنگنات پتاسیم (Bashour and Sayegh, 2007)، رس، سیلت و شن به روش هیدرومتری (Gee and Bauder, 1986)، pH خاک در گل اشباع (McLean, 1982)، ماده آلی به روش والکلی- بلک (Nelson and Sommers, 1982)، پتاسیم به روش استات آمونیوم (Schneider, 1997)، فسفر به روش اولسن و سامرز (Olsen, 1982 and Sommers)، منگنز، آهن و روی به روش عصاره-گیری با DTPA (Lindsay and Norvel, 1978) اندازه‌گیری شد. دامنه آهک معادل خاک‌ها از ۲ تا ۴۵ درصد، آهک فعال از صفر تا ۱۶ درصد، رس از ۱۳ تا ۴۱ درصد، سیلت از ۱۸ تا ۳۷

کنند (Asadi Kangarshahi and Akhlaghi Amiri, 2022). برخی منابع نیز گزارش کرده‌اند که پایه‌های گوتو و اسموت فلت سویل متحمل به خاک‌های آهکی هستند و پاسخ آن‌ها مشابه نارنج گزارش شده است (Castle et al., 1992; Singh et al., 2002; Forner-Giner et al., 2020).

براساس نتایج پژوهشی در شرق مازندران، پایه ترویرسیترنج برای خاک‌های با آهک کل کمتر از ۲۰ درصد یا آهک فعال کمتر از ۱۰ درصد توصیه می‌شود و در خاک‌های با آهک کل بیشتر از ۲۰ درصد یا آهک فعال بیشتر از ۱۰ درصد زردی و کاهش رشد نشان می‌دهد؛ بنابراین این پایه برای خاک‌های بخش‌های عمده‌ای از شرق مازندران (ساری، میانرود و نکا) با آهک کل یا کربنات کلسیم بیشتر از ۲۰ درصد توصیه نمی‌شود اما این پایه‌ها به دلیل مقاومت به بیماری تربستیزا مورد توجه قرار گرفته‌اند (Asadi Kangarshahi, 2018). نتایج پژوهشی با پایه سی ۳۵ نشان داد که با افزایش آهک فعال در خاک، غلظت آهن فعال در برگ نارنگی انشو با پایه سی-۳۵ کاهش یافت؛ بنابراین این پایه برای خاک‌های با آهک کل بیشتر از ۱۴ درصد یا آهک فعال تا حدود ۵ درصد توصیه می‌شود (Asadi Kangarshahi and Akhlaghi Amiri, 2020). گزارش‌های مختلف نشان می‌دهد که مناسب‌ترین روش برای حل چالش کلروز آهن، انتخاب پایه‌های متحمل است (Castle et al., 2001; Pestana et al., 2010). نتایج برخی پژوهش‌ها نشان داده است که از برخی پارامترهای فتوسنتز مانند غلظت کلروفیل و شاخص فلورنس کلروفیل می‌توان برای انتخاب و غربالگری ژنوتیپ‌های مختلف به تنش‌های محیطی استفاده شود، این پارامترهای فتوسنتزی هر گونه تنش و محدودیت در فرآیندهای فتوسنتزی را به‌خوبی نشان می‌دهند و ژنوتیپ‌های متحمل‌تر به تنش، تغییرات کمتری در پارامترهای فتوسنتزی در پاسخ به تنش دارند (Belkhdja et al., 1994; Mishra et al., 2011; Salisbury et al., 1992; Ibrahim, 2020). به‌طور کلی استفاده از پایه مناسب در هر منطقه می‌تواند در تعدیل تنش‌ها، متابولیسم و وضعیت تغذیه‌ای مرکبات مؤثر باشد (Hippler et al., 2016; Martínez-Cuenca et al., 2021). در باغبانی فرآیند جایگزینی پایه‌های معمول هر منطقه و انتخاب پایه‌های جدید باید با ارزیابی‌های بلندمدت پشتیبانی شود، زیرا ویژگی‌های منفی می‌توانند پس از سال‌ها ارزیابی در ترکیب با گونه‌های خاص پیوندک آشکار شوند (Caruso et al., 2024; Smith et al., 2024).

در استان مازندران با توجه به تغییرات ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک از شمال به جنوب و از غرب به شرق به‌ویژه تغییرات رس از ۳ درصد تا بیشتر ۴۰ درصد و همچنین آهک از

درصد، شن از ۳۴ تا ۵۸ درصد و کربن آلی از ۰/۶۵ تا ۱/۸۰ درصد متغیر بود (جدول ۱).

مقدار ۳۰ کیلوگرم خاک از نمونه‌های خاک مورد نظر، در سطل‌های پلاستیکی ریخته شد. کود نیتروژنی به میزان ۶۰ میلی گرم نیتروژن خالص در کیلوگرم خاک از منبع سولفات آمونیوم اضافه گردید. قبل از کاشت، کودهای فسفر (سوپر فسفات تریپل) و پتاسیم (سولفات پتاسیم) فقط به خاک‌هایی افزوده شد که به ترتیب کمتر از ۱۵ میلی گرم در کیلوگرم فسفر قابل استفاده و کمتر از ۳۰۰ میلی گرم در کیلوگرم پتاسیم قابل استفاده داشتند. ۲۰ میلی گرم فسفر و ۲۰۰ میلی گرم پتاسیم در کیلوگرم به خاک شماره ۵ و ۲۵ میلی گرم فسفر و ۱۰۰ میلی گرم پتاسیم در کیلوگرم به خاک شماره ۷ افزوده شد. سپس نهال‌های نارنگی انشو میاگاوا با پایه نارنج تقریباً یکسان با ارتفاع حدود ۵۰ سانتی‌متر و قطر حدود یک سانتی‌متر در هر خاک کاشته شد. آزمایش به مدت دو سال و به شکل گلدانی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با هفت خاک با دامنه متفاوت کربنات کلسیم معادل در چهار تکرار با ۲۸ گلدان انجام شد. بعد از کاشت نهال‌ها، در طول دوره رشد، تغذیه به صورت کودآبیاری با کودهای نیترات پتاسیم (۱/۴ میلی‌مول در لیتر)، سولفات پتاسیم (۰/۶ میلی‌مول در لیتر)، سولفات منیزیم (یک میلی‌مول در لیتر)، مونوآمونیوم فسفات (۰/۶ میلی‌مول در لیتر)، سولفات آمونیوم (۳ میلی‌مول در لیتر)، مولیبدات آمونیوم (یک میکرومول در لیتر) هر دو هفته یک‌بار انجام شد و آبیاری با توزین تصادفی گلدان‌های آزمایشی (Fadl, 2008) به‌طور منظم (ضریب تخلیه رطوبت حدود ۳۵ درصد) انجام شد. نمونه‌های برگ در مرداد ماه از برگ‌های میانی سرشاخه‌های فصل جاری در پیرامون هر نهال تهیه شد. نمونه‌های گیاه ابتدا به روش خشک اکسید شد و سپس غلظت آهن، منگنز، روی و مس توسط دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد.

## آهن فعال

اندازه‌گیری آهن فعال به روش عصاره‌گیری با محلول فنانترویلین ۱/۵ درصد عصاره‌گیری و در طول موج ۵۱۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت شد (Basar, 2003; Neaman and Aguirre, 2007).

## شاخص درجه زردی

برای تعیین درجه زردی برگ‌ها، در سال دوم رشد، بر اساس درجه زردی برگ‌های جدید توسعه یافته و شمارش آن‌ها،

به هر نهال در هر خاک، به‌طور میانگین درجه‌ای از یک تا پنج داده شد. به این صورت که؛ ۱. برگ‌های سبز و بدون هیچ‌گونه علائمی؛ ۲. بین رگبرگ‌ها سبز متمایل به زرد و رگبرگ‌ها سبز؛ ۳. بین رگبرگ‌ها زرد متمایل به سبز و رگبرگ‌ها سبز؛ ۴. بین رگبرگ‌ها زرد و رگبرگ‌ها سبز؛ ۵. بین رگبرگ‌ها زرد متمایل به سفید، رگبرگ‌ها سبزرنگ پریده و همچنین مقداری ریزش برگ) داده شد (Byrne et al., 1995).

## غلظت کلروفیل برگ

در سال دوم آزمایش، نمونه‌های برگ از هر تیمار تهیه شد. مقدار ۰/۲ گرم از نمونه برگ‌های هر تیمار به‌دقت وزن، در هاون چینی ساییده و استون ۸۰ درصد به آن اضافه شد. سپس محلول حاوی کلروفیل نمونه‌ها استخراج و میزان جذب آن‌ها توسط دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت شد. برای این منظور، ابتدا قرائت اسپکتروفتومتر برای استون روی صفر تنظیم شد و میزان جذب محلول در طول موج‌های ۶۴۵ نانومتر و ۶۶۳ نانومتر قرائت شد، سپس غلظت کلروفیل محاسبه شد (Abadia and Abadia, 1993). غلظت کلروفیل‌های a و b و مجموع کلروفیل‌های a و b (کلروفیل کل) از روابط زیر محاسبه شد (Arnon, 1949).

$$\text{Chl.a} = 12.7 \times (A_{663}) \times 2.69 (A_{645}) V / (1000 \times W)$$

$$\text{Chl.b} = 22.9 \times (A_{663}) \times 4.69 (A_{645}) V / (1000 \times W)$$

$$\text{Chl.T} = 20.2 \times (A_{663}) \times 8.02 (A_{645}) V / (1000 \times W)$$

در روابط فوق، A طول موج قرائت (نانومتر)، V حجم نهایی محلول عصاره (میلی‌لیتر) و W وزن نمونه (گرم) است.

## شاخص فلورسنس

در سال دوم آزمایش، پارامترهای فلورسنس کلروفیل در برگ‌های جوان کاملاً توسعه یافته نهال‌ها ( $F_0$ : فلورسنس پایه،  $F_m$ : فلورسنس حداکثر در اولین پالس اشباع نوری بعد از سازگاری با تاریکی و  $F_v$ : تغییرات فلورسنس ( $F_m - F_0$ )) با استفاده از فلورومتر پرتابل (Efficiency Analyser, PEA, Hansatech Plant Instrument Ltd., England) بعد از ۳۰ دقیقه انطباق تاریکی اندازه‌گیری شد. برای سازگاری با تاریکی، ابتدا قسمتی از برگ نهال‌ها (با کلیپ‌های مخصوص) برای مدت‌زمان ۳۰ دقیقه در تاریکی قرار داده شد. بعد از اتمام سازگاری با تاریکی، با قرار دادن سنسور فلورومتر به کلیپ‌ها، ارتباط اندام سازگاری شده با تاریکی و منبع نور تنظیم‌شده فلورومتر برقرار نموده و پارامترهای فلورسنس کلروفیل قرائت گردید. سپس شاخص تغییرات کلروفیل

$$TF = C_{NEL} / C_{NE.R}$$

TF = ضریب انتقال

$C_{NEL}$  = غلظت عنصر در برگ

$C_{NE.R}$  = غلظت عنصر در ریشه

فلورسنس (Arbona, ) محاسبه گردید ( $F_v / F_m = (F_m - F_0) / F_m$ )

(2009; Maxwell and Johnson, 2000).

### ضریب انتقال

ضریب انتقال<sup>۲</sup> عناصر غذایی که توانایی گیاهان برای

انتقال عناصر از ریشه به برگ‌ها را نشان می‌دهد از طریق رابطه

زیر محاسبه شد (Asadi Kangarshahi et al., 2019).

جدول ۱- برخی خواص فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد آزمایش.

Table 1. Some physical and chemical properties of experiment soils.

شماره خاک و منطقه Soil No. and location							ویژگی properties
7	6	5	4	3	2	1	
شرق ساری East of Sari	غرب ساری West of Sari	شمال نکا North of Neka	غرب نکا West of Neka	جنوب ساری South of Sari	غرب قائم‌شهر West of Ghaemshar	جنوب بابل South of Babol	
23	37	13	41	19	29	23	رس (درصد) clay (%)
37	29	29	18	35	26	30	سیلت (درصد) silt (%)
40	34	58	41	46	45	47	شن (درصد) sand (%)
لوم loam	لوم رسی Sandy loam	لوم شنی sandy loam	رسی clay	لوم loam	لوم رسی clay loam	لوم loam	کلاس بافتی خاک Soil texture class
45	25	40	30	14	9	2	آهک کل (درصد) Total lime (%)
16	10	7	14	5	3	0	آهک فعال (درصد) Active lime (%)
1.10	1.52	0.65	1.60	1.80	0.95	1.17	کربن آلی (درصد) O.C. (%)
7.76	7.81	7.77	7.60	7.86	7.45	6.81	واکنش گل اشباع pH
9.87	18.30	11.20	17.11	15.09	22.21	26.34	فسفر P (mg/kg)
265	325	221	460	360	380	404	(میلی گرم در کیلوگرم) K (mg/kg) پتاسیم
6.80	8.22	4.40	8.90	8.80	6.40	7.20	(میلی گرم در کیلوگرم) Fe (mg/kg) آهن
3.40	7.71	3.20	5.40	3.96	4.20	3.10	(میلی گرم در کیلوگرم) Mn (mg/kg) منگنز
1.50	1.60	0.91	0.60	0.70	2.50	2.40	(میلی گرم در کیلوگرم) Zn (mg/kg) روی

در پایان، کلیه داده‌های حاصل با استفاده از نرم‌افزار SPSS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و میانگین پارامترهای مورد مطالعه با استفاده از آزمون دانکن در سطح پنج درصد مقایسه شدند و توصیه‌های لازم ارائه شد.

به‌طور کلی، پاسخ‌های گیاهی شامل روند رشد رویشی، وزن خشک، شاخص درجه زردی برگ، رابطه آهک فعال در خاک با آهن فعال در برگ، غلظت نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم، منبزم، گوگرد، آهن کل و فعال، منگنز، روی و مس در برگ و ریشه، غلظت کلروفیل و شاخص فلورسنس کلروفیل بود.

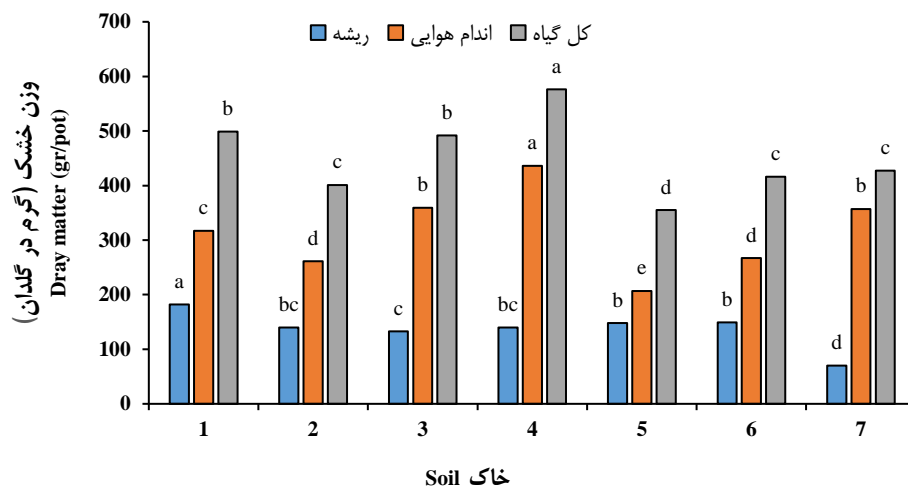
<sup>2</sup>- Translocation Factor

## نتایج و بحث

## وزن خشک

تأثیر خاک‌های مختلف بر وزن خشک اندام هوایی و ریشه از نظر آماری در سطح پنج درصد معنی‌دار بود. بیشترین وزن کل و وزن خشک اندام هوایی در خاک شماره ۴، با بافت رسی با آهک کل ۳۰ درصد حاصل شد. در مقابل کمترین وزن خشک اندام هوایی در خاک شماره ۵ با بافت لوم شنی و با محتوای آهک کل ۴۰ درصد حاصل شد. اما در مورد ریشه، بیشترین وزن خشک از خاک یک با بافت لوم با آهک کل ۲ درصد حاصل شد، در مقابل کمترین وزن خشک ریشه از خاک هفت با بافت لوم و آهک کل ۴۵ درصد بود (شکل ۲). کربنات کلسیم به دلیل داشتن انرژی جذب

سطحی متفاوت از دیگر ذرات هم قطر خود، بر ویژگی‌های رطوبتی خاک تأثیر دارد. نتایج پژوهش‌های مختلف نشان داده است که انرژی جذب سطحی کربنات کلسیم کمتر از دیگر ذرات هم قطر خود در خاک است. بنابراین مقدار آهک خاک بر ظرفیت نگهداری آب و عناصر غذایی تأثیر دارد. بافت خاک نیز بر میزان نگهداری آب و عناصر غذایی در خاک تأثیر زیادی دارد، خاک‌های بافت درشت معمولاً ظرفیت کمتری برای نگهداری آب و عناصر غذایی دارند بنابراین یکی از مهم‌ترین دلایل کاهش رشد نارنج در خاک‌های بافت سبک با آهک بالا می‌تواند تأثیر متقابل بافت و آهک باشد (Asadi Kangarshahi and Akhlaghi Amiri, 2025; Bashour and Sayegh, 2007).



شکل ۱- میانگین وزن خشک اندام هوایی و ریشه نهال‌های نارنگی انشو میاگاو با پایه نارنج.

Fig 1. Mean dry weight of shoots and roots of 'Anshu Miyagawa' mandarin seedlings grafted onto sour orange rootstock.

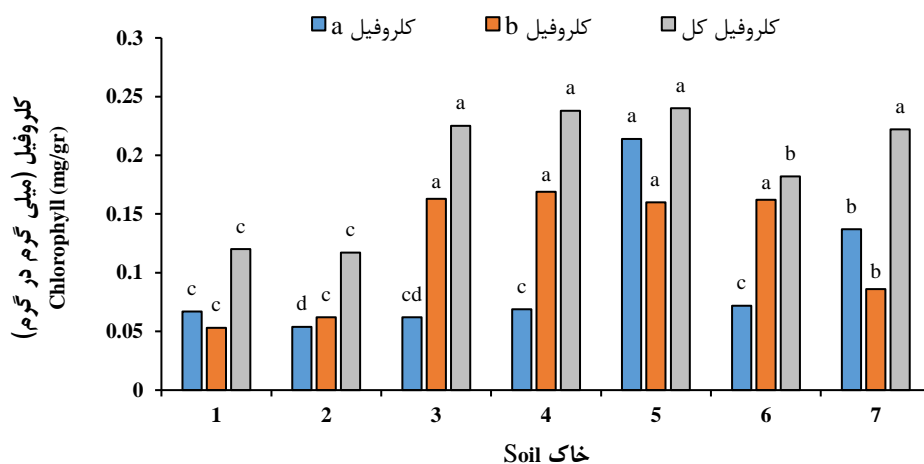
(Akhlaghi Amiri, 2021); اما نتایج این پژوهش نشان داد که غلظت آهن فعال برگ‌ها در خاک‌های یک و دو تفاوت معنی‌داری با خاک‌های سه، پنج، شش و هفت نداشتند. با این وجود، غلظت منگنز برگ آن‌ها کمتر از دیگر خاک‌ها بود؛ بنابراین کلروفیل برگ‌ها به دیگر عناصر از جمله منگنز نیز بستگی دارد. این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های گذشته مطابقت داشت که گزارش کردند کمبود عناصر غذایی بر بیوشیمی، مورفولوژی و فیزیولوژی برگ درختان مرکبات تأثیر دارد و هر یک از این عناصر در بیوسنتز و فعال‌سازی بسیاری از آنزیم‌ها مؤثر هستند که برخی از این آنزیم‌ها در بیوسنتز کلروفیل نقش اساسی دارند (Larbi et al., 2006; Mengel, 1995). بنابراین، کمبود منگنز می‌تواند موجب کاهش غلظت کلروفیل برگ شود (Martínez-Cuenca et al., 2013; 2017). مهم‌ترین علت کمبود منگنز در خاک‌های با آهک کم و بدون آهک، کاهش

## کلروفیل برگ

بیشترین میانگین غلظت کلروفیل در خاک‌های سه (بافت لوم و آهک ۱۴ درصد)، چهار (بافت رسی و آهک ۳۰ درصد)، پنج (بافت لوم شنی و آهک ۴۰ درصد) و هفت (بافت لوم و آهک ۴۵ درصد) حاصل شد و کمترین میانگین غلظت کلروفیل از خاک یک (بافت لوم و آهک ۳ درصد) و دو (بافت لوم و آهک ۹ درصد) به دست آمد. بیشترین و کمترین غلظت کلروفیل a به ترتیب از خاک‌های پنج و دو مشاهده شد و خاک‌های سه، چهار، پنج و شش بیشترین کلروفیل b و خاک یک کمترین کلروفیل b را داشت (شکل ۲). به‌طور کلی، گزارش‌های پژوهشی نشان داده است که با افزایش کربنات کلسیم فعال خاک، میانگین غلظت آهن فعال برگ‌ها کاهش یافت و با کاهش میانگین غلظت آهن فعال برگ، میانگین غلظت کلروفیل برگ‌ها کاهش نشان داد (Asadi Kangarshahi and

نتایج ضریب همبستگی برخی ویژگی‌های خاکی با کلروفیل برگ نشان داد که آهن کل، آهن فعال و pH بیشترین همبستگی مثبت را با کلروفیل داشتند. در مقابل، فسفر و روی قابل‌استفاده خاک بیشترین همبستگی منفی را نشان دادند (جدول ۲). ضریب همبستگی کلروفیل با غلظت عناصر غذایی برگ نیز نشان داد که غلظت منگنز در برگ بیشترین همبستگی مثبت با کلروفیل برگ دارد، آهن فعال، فسفر، منیزیم و پتاسیم به ترتیب پس از منگنز قرار گرفتند. گوگرد، روی، نیتروژن، آهن کل، کلسیم و مس نیز به ترتیب بیشترین همبستگی منفی با کلروفیل برگ نشان دادند (جدول ۳).

قابلیت استفاده کلسیم در خاک و ریشه است کاهش فراهمی کلسیم، جذب برخی عناصر کم‌مصرف به‌ویژه منگنز را کاهش می‌دهد (Asadi Kangarshahi, 2019; Asadi Kangarshahi and Akhlaghi Amiri, 2021). به‌طور کلی کمبود منگنز می‌تواند موجب کاهش غلظت کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئیدها شود و همچنین موجب چندین خسارت بیوشیمیایی و ریزساختاری می‌شود که مانند دیگر تنش‌های زنده و غیر زنده، تولید گونه‌های فعال اکسیژن را افزایش می‌دهد. تولید این گونه‌های اکسیژن فعال پیامد تغییر در زنجیره انتقال الکترون، خسارت فراساختاری به کلروپلاست‌ها و کاهش بیوسنتز کاروتنوئیدها است (Martínez-Cuenca et al., 2017; Mengel, 2001).



شکل ۲- میانگین غلظت کلروفیل برگ نهال‌های نارنگی انشو میاگاو با پایه نارنج.

Fig 2. Mean leaf chlorophyll concentration of 'Anshu Miyagawa' mandarin seedlings grafted onto sour orange rootstock.

جدول ۲- ضریب همبستگی کلروفیل برگ با برخی ویژگی‌های خاکی در نهال‌های نارنگی انشو میاگاو با پایه نارنج.

Table 2. Correlation coefficients between leaf chlorophyll and selected soil properties in 'Anshu Miyagawa' mandarin seedlings grafted onto sour orange rootstock.

کربن آلی Organic carbon	آهن فعال Active lime	آهن کل lime	شن sand	سیلت silt	رس clay	کلروفیل برگ (میلی‌گرم در گرم) Leaf chlorophyll (mg/kg)
درصد %						
0.20	0.69	0.78	0.12	0.04	-0.12	
Zn روی	Mn منگنز	Fe آهن	K پتاسیم	P فسفر	pH	
میلی‌گرم در کیلوگرم mg/kg						
-0.95	0.04	0.07	-0.36	-0.86	0.74	

جدول ۳- ضریب همبستگی کلروفیل با غلظت عناصر غذایی در برگ نهال‌های نارنگی انشو میاگاوا با پایه نارنج.

Table 3. Correlation coefficients between chlorophyll and nutrient concentrations in the leaves of 'Anshu Miyagawa' mandarin seedlings grafted onto sour orange rootstock.

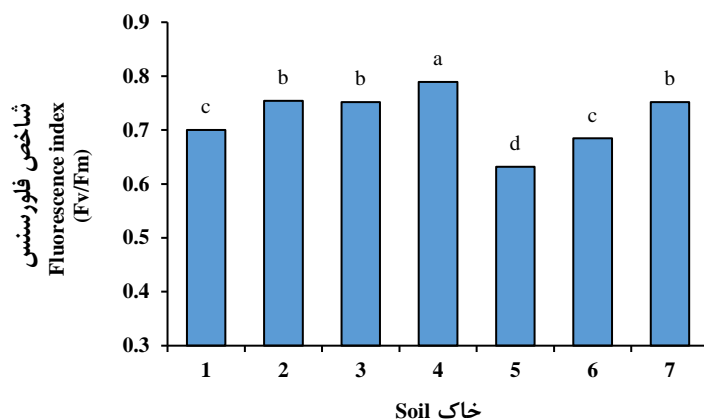
غلظت عناصر پر مصرف در برگ (درصد)						کلروفیل برگ (میلی‌گرم در گرم)
Leaf macronutrient concentrations (%)						
گوگرد S	کلسیم Ca	منیزیم Mg	پتاسیم K	فسفر P	نیترژن N	Leaf chlorophyll (mg/kg)
-0.70	-0.14	0.13	0.08	0.22	-0.34	
غلظت عناصر کم مصرف در برگ (میلی‌گرم در کیلوگرم)						
Leaf micronutrient concentrations (mg/kg)						
مس Cu	روی Zn	منگنز Mn	آهن فعال Active Fe	آهن Fe		
-0.04	-0.54	0.43	0.34	-0.24		

### شاخص فلورسنس (Fv/Fm)

نتایج اثر خاک‌های مختلف بر میانگین شاخص فلورسنس کلروفیل نارنگی انشو با پایه نارنج نشان داد که نهال‌ها در خاک چهار، بیشترین وزن خشک و بیشترین شاخص فلورسنس کلروفیل داشتند. در مقابل در خاک پنج، دارای کمترین وزن خشک و کمترین شاخص فلورسنس بودند (شکل ۳). شاخص فلورسنس کلروفیل، یک شاخص حساسیت برای راندمان عملکرد دستگاه فتوسنتزی است و نشر فلورسنس کلروفیل با فتوسنتز رابطه معکوس دارد و تحت شرایط تنش، تولید گرما در بافت‌های گیاهی (برای اتلاف زیاده انرژی) افزایش می‌یابد. اگر چه در برخی موارد، در مراحل اولیه تنش نشر فلورسنس ممکن است به طور موقت کاهش (افزایش موقتی شاخص فلورسنس) یابد؛ اما همواره یک تعادل نسبی بین سه مکانیسم عمده مصرف و اتلاف انرژی (فتوسنتز، تولید گرما و نشر فلورسنس کلروفیل) وجود دارد، این تعادل که الگوی واقعی پایش فلورسنس کلروفیل را در تنش‌های مختلف تعیین می‌کند (Salisbury and Ross, 1992)؛ بنابراین بر اساس نتایج این تحقیق، شاخص فلورسنس کلروفیل در این پایه و پیوندک به طور معنی‌داری تحت تأثیر ویژگی‌های خاک قرار می‌گیرد که با نتایج گزارش‌های Asadi Kangarshahi و همکاران (۲۰۱۳) مطابقت دارد که گزارش کردند بین مقدار سیلت، کربن آلی و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک‌های مختلف و مقدار شاخص فلورسنس کلروفیل درختان مرکبات ارتباط معنی‌داری وجود دارد و با

افزایش سیلت و کربن آلی خاک شاخص فلورسنس افزایش می‌یابد، اما با افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، ابتدا شاخص فلورسنس افزایش و سپس کاهش می‌یابد. شاخص فلورسنس کلروفیل مطلوب درختان نارنگی انشو در خاک‌های مختلف به طور متوسط حدود ۰/۷۲ است و اعداد کمتر از آن را نشان‌دهنده وجود تنش در این درختان است، همچنین گزارش‌های دیگر پژوهشگران عدد مناسب شاخص فلورسنس کلروفیل، برای بیشتر گونه‌های گیاهی حدود ۰/۸۳ گزارش کرده‌اند و اعداد کمتر از آن را نشان‌دهنده وجود تنش در آن گیاهان است (Belkhdja et al., 1994)؛ بنابراین، براساس گزارش شاخص فلورسنس مطلوب برگ نارنگی انشو، نهال‌های نارنگی انشو با پایه نارنج در خاک‌های یک، پنج و شش، شاخص فلورسنس کمتر از حد مطلوب داشتند که نشان می‌دهد نهال‌ها در این خاک‌ها از تنش بیشتری برخوردار بودند.

نتایج ضریب همبستگی برخی ویژگی‌های خاکی و غلظت عناصر غذایی برگ با شاخص فلورسنس نشان داد که از ویژگی‌های خاکی، پتاسیم و آهن قابل استفاده خاک، کربن آلی، رس و آهک فعال خاک بیشترین همبستگی مثبت را با شاخص فلورسنس داشتند. در مقابل، شن، سیلت و آهک کل به ترتیب بیشترین همبستگی منفی نشان دادند. فسفر و کلسیم در برگ نیز به ترتیب بیشترین همبستگی مثبت و منفی را با شاخص فلورسنس برگ داشتند (جدول‌های ۴ و ۵).



شکل ۳- میانگین شاخص فلورسنس برگ نهال‌های نارنگی انشو میاگاو با پایه نارنج.

Fig 3. A Mean leaf fluorescence index of 'Anshu Miyagawa' mandarin seedlings grafted onto sour orange rootstock.

جدول ۴- ضریب همبستگی شاخص فلورسنس کلروفیل (Fv/Fm) برگ با برخی ویژگی‌های خاکی در نهال‌های نارنگی انشو میاگاو با پایه نارنج

Table 4. Correlation coefficients between the leaf chlorophyll fluorescence index (Fv/Fm) and selected soil properties in 'Anshu Miyagawa' mandarin seedlings grafted onto sour orange rootstock.

کربن آلی Organic carbon	آهک فعال Active lime	آهک lime	شن sand	سیلت silt	رس clay	شاخص فلورسنس Fluorescence index (Fv/Fm)
0.55	0.31	-0.14	-0.49	-0.22	0.50	
درصد %						
Zn روی	Mn منگنز	Fe آهن	K پتاسیم	P فسفر	pH	شاخص فلورسنس Fluorescence index (Fv/Fm)
میلی‌گرم در کیلوگرم mg/kg						
-0.09	0.046	0.66	0.67	0.09	0.03	

جدول ۵- ضریب همبستگی شاخص فلورسنس (Fv/Fm) با غلظت عناصر غذایی در برگ نهال‌های نارنگی انشو میاگاو با پایه نارنج.

Table 5. Correlation coefficients between the chlorophyll fluorescence index (Fv/Fm) and nutrient concentrations in the leaves of 'Anshu Miyagawa' mandarin seedlings grafted onto sour orange rootstock.

غلظت عناصر پر مصرف در برگ (درصد) Leaf macronutrient concentrations (%)						شاخص فلورسنس Fluorescence index (Fv/Fm)
گوگرد S	کلسیم Ca	منیزیم Mg	پتاسیم K	فسفر P	نیتروژن N	
0.05	-0.35	0.14	0.12	0.57	0.15	
غلظت عناصر کم مصرف در برگ (میلی‌گرم در کیلوگرم) Leaf micronutrient concentrations (mg/kg)						شاخص فلورسنس Fluorescence index (Fv/Fm)
Cu مس	Zn روی	Mn منگنز	Active Fe آهن فعال	Fe آهن		
-0.26	-0.24	-0.19	0.38	0.30		

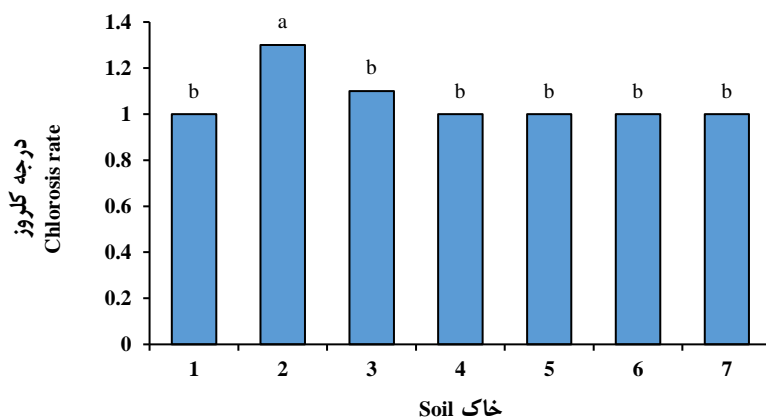
### شاخص درجه زردی برگ

نتایج میانگین درجه کلروز نهال‌های نارنگی انشو میاگاو با پایه نارنج در خاک‌های مختلف نشان داد که اختلاف معنی‌داری در درجه زردی برگ در خاک‌های با کمترین آهک (۲ درصد) و بیشترین آهک (۴۵ درصد) وجود نداشت. درجه زردی در خاک دو با آهک ۹ درصد بیشتر از سایر خاک‌ها بود که به نظر می‌رسد عاملی غیر از آهک در زردی دخالت داشته

است (شکل ۴). علائم برگ نارنگی انشو با پایه نارنج در خاک‌های مختلف در (شکل ۵) نشان داد شده است. شاخص درجه زردی برگ نارنگی انشو با پایه نارنج در خاک‌های مختلف نشان داد که ارتباط معنی‌داری بین مقدار کربنات کلسیم کل و زردی ناشی از کمبود آهن در این نهال‌ها مشاهده نشد. نتایج برخی پژوهش‌های دیگر نشان داده است که همیشه یک ارتباط خوبی بین مقدار کربنات کلسیم کل و کاهش رشد و

Martinez-Guenca و همکاران (۲۰۱۷) مطابقت داشت، اما به نظر نگارندگان به تحقیقات بیشتری نیاز دارد.

زردی ناشی از کمبود آهن در درختان مشاهده نشده است. افزایش درجه کلروز در خاک دو، احتمالاً به علت کمبود منگنز است که با گزارش‌های Castle و Nunnallee (۲۰۰۹) و



شکل ۴- میانگین درجه کلروز برگ نهال‌های نارنگی انشو میاگوا با پایه نارنج.

Fig 4. Mean leaf chlorosis degree of 'Anshu Miyagawa' mandarin seedlings grafted onto sour orange rootstock.



شکل ۵- علائم زرد برگ‌های نارنگی انشو میاگاو با پایه نارنج در خاک‌های آهکی.

Fig 5. Leaf chlorosis symptoms of *Citrus unshiu* cv. Miyagawa seedlings on Sour Orange rootstock in calcareous soils.

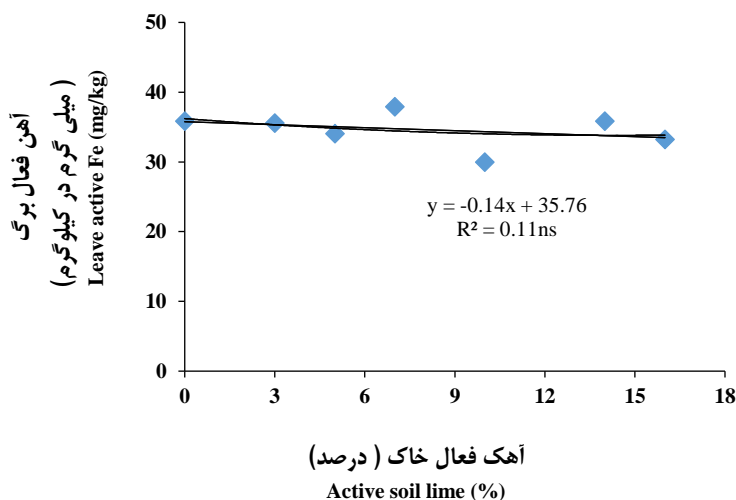
درختان مرکبات حدود ۴ تا ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم گزارش شده است (Asadi Kangarshahi and Akhlaghi Amiri, 2019). دامنه آهن قابل استفاده خاک‌های آزمایشی از ۴/۴۰ تا ۸/۹۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. بنابراین، مقدار آهن قابل استفاده در همه خاک‌ها بیشتر از حد کفایت بود. در گیاهان رشد یافته در خاک پنج که آهن قابل استفاده آن ۴/۴۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بود،

#### رابطه آهک فعال خاک با غلظت آهن فعال برگ

نتایج این پژوهش نشان داد بین آهک فعال خاک‌ها و غلظت آهن فعال برگ نهال‌های نارنگی انشو با پایه نارنج، همبستگی معنی‌داری وجود نداشت و با افزایش آهک فعال خاک‌ها، غلظت آهن فعال برگ تغییرات چندانی نداشت (شکل ۶). حد کفایت آهن قابل استفاده در خاک (با عصاره‌گیر DTPA) برای

فعال در برگ همبستگی ضعیفی وجود دارد و بین سایر ویژگی خاک‌ها و غلظت آهن فعال برگ رابطه معنی‌داری حاصل نشد. در کل، نتایج این تحقیق نشان داد که درختان نارنگی انشو با پایه نارنج در خاک‌های آهکی با دامنه آهک از ۲ تا ۲۵ درصد علائم زرد برگی ناشی از آهک نشان نداشتند اما در خاک دو که آهک خاک حدود ۹ درصد بود، رنگ برگ‌ها علائم کلروز خیلی خفیفی داشت اما غلظت آهن فعال در آن‌ها تفاوت معنی‌داری با دیگر خاک‌ها نداشت. بنابراین، غلظت آهن فعال و علائم برگی در این پایه تحت تأثیر ویژگی‌های خاک قرار نگرفت. علائم برگی نهال-های نارنگی انشو با پایه نارنج در (شکل ۵) نشان داده شده است.

غلظت آهن فعال در برگ ۳۷ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. اما در خاک شش که آهن قابل‌استفاده آن ۸/۲۳ میلی‌گرم در کیلوگرم بود، غلظت آهن فعال در برگ ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. لذا غلظت آهن فعال در برگ نارنگی انشو با پایه نارنج به عواملی دیگر غیر از مقدار آهن قابل‌استفاده خاک بستگی دارد. بافت خاک، آهک خاک، بی‌کربنات محلول خاک، ویژگی‌های بیولوژیکی و فیزیکی خاک نیز از عوامل اصلی کنترل‌کننده غلظت آهن در محلول خاک و غلظت آهن فعال در برگ هستند که نقش زیادی در فراهمی آهن برای درختان در خاک‌های آهکی دارند (Asadi Kangarshahi and Akhlaghi Amiri, 2025). نتایج این تحقیق نشان داد که تنها بین مقدار آهک فعال با غلظت آهن



شکل ۶- رابطه آهک فعال خاک با غلظت آهن فعال در برگ نارنگی انشو با پایه نارنج.

Fig 6. Relationship between active soil lime and leaf available iron concentration in 'Anshu' mandarin grafted onto sour orange rootstock.

برخوردار بود. میانگین ضریب انتقال عناصر پرمصرف نشان داد که گوگرد به علت تحرک پایین در درختان مرکبات، کمترین ضریب انتقال و منیزیم بیشترین ضریب انتقال از ریشه به اندام هوایی را داشتند و عناصر کلسیم، نیتروژن، پتاسیم و فسفر به ترتیب پس از منیزیم قرار داشتند. به‌طورکلی، دامنه این میانگین ضرایب انتقال برای عناصر پرمصرف از ۰/۴۹ تا ۲/۵۰ متغیر بود که نشان‌دهنده تفاوت در روند تجمع و تخلیه عناصر در ریشه است (شکل ۷).

#### غلظت عناصر پرمصرف در برگ و ریشه

نتایج میانگین غلظت نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و گوگرد در ریشه و برگ نهال‌های نارنگی انشو با پایه نارنج در (جدول‌های ۶ و ۷) نشان داده شده است. میانگین غلظت نیتروژن، پتاسیم، کلسیم و منیزیم در برگ به ترتیب ۱/۴۷، ۱/۵۳، ۱/۴۷ و ۲/۵۰ برابر غلظت آن‌ها در ریشه بود. میانگین غلظت فسفر و گوگرد در برگ به ترتیب حدود ۰/۹۸ و ۰/۴۹ غلظت آن‌ها در ریشه بود. منیزیم از بیشترین اختلاف غلظت بین ریشه و برگ

جدول ۶- میانگین غلظت عناصر پرمصرف (درصد وزن خشک) در برگ نهال‌های انشو (پایه نارنج) در هفت خاک مختلف.

Table 6. Mean macronutrient concentrations (percentage of dry weight) in the leaves of 'Anshu' mandarin seedlings (sour orange rootstock) across seven different soils.

غلظت عناصر پرمصرف در برگ (درصد بر اساس وزن خشک)* Leaf macronutrient concentrations (% of dry weight)*						خاک soil
S گوگرد	Mg منیزیم	Ca کلسیم	K پتاسیم	P فسفر	N نیتروژن	
0.22 b	0.562 b	4.61 b	0.90 c	0.122 b	2.64 b	1
0.27 a	0.507 b	4.67 b	1.21 b	0.127 b	2.85 a	2
0.12 d	0.650 a	3.52 c	0.81 d	0.142 a	2.56 bc	3
0.19 c	0.629 a	3.60 c	0.99 c	0.144 a	2.63 b	4
0.17 c	0.591 b	6.05 a	1.22 bc	0.120 b	2.70 ab	5
0.23 b	0.263 c	1.44 d	0.93 c	0.100 c	2.46 c	6
0.21 b	0.297 c	1.75 d	1.49 a	0.112 bc	2.67 b	7
0.202	0.50	3.66	1.06	0.123	2.64	average میانگین

\* میانگین‌های مربوط به هر ستون که دارای حروف لاتین مشترک هستند در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

\* The averages for each column that have the same letters are not significantly different from each other at the 5% probability level.

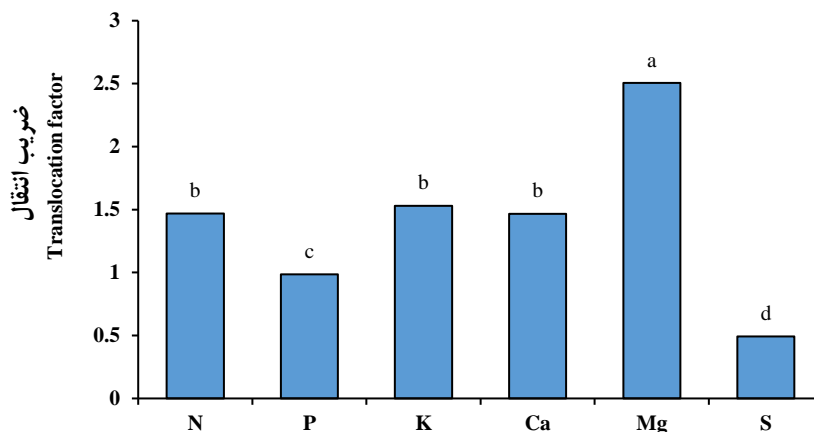
جدول ۷- میانگین غلظت عناصر پرمصرف (درصد وزن خشک) در ریشه نهال‌های انشو (پایه نارنج) در هفت خاک مختلف.

Table 6. Mean macronutrient concentrations (percentage of dry weight) in the roots of 'Anshu' mandarin seedlings (sour orange rootstock) across seven different soils.

غلظت عناصر پرمصرف در ریشه (درصد بر اساس وزن خشک)* Root macronutrient concentrations (% of dry weight)*						خاک soil
S گوگرد	Mg منیزیم	Ca کلسیم	K پتاسیم	P فسفر	N نیتروژن	
0.358 e	0.163 d	2.37 c	0.778 bc	0.173 a	1.96 a	1
0.354 e	0.183 c	2.40 c	0.670 cd	0.138 b	1.74 c	2
0.391 d	0.153 d	2.71 b	0.705 c	0.113 c	1.60 d	3
0.423 c	0.183 c	1.91 d	0.639 d	0.136 b	1.85 b	4
0.448 b	0.223 b	1.93 d	1.11 a	0.141 b	1.92 a	5
0.428 c	0.243 a	2.60 b	0.813 b	0.140 b	1.59 d	6
0.473 a	0.223 b	3.55 a	0.952 ab	0.089 d	1.85 a	7
0.41	0.20	2.50	0.81	0.133	1.80	average میانگین

\* میانگین‌های مربوط به هر ستون که دارای حروف لاتین مشترک هستند در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

\* The averages for each column that have the same letters are not significantly different from each other at the 5% probability level.



شکل ۷- میانگین ضریب انتقال عناصر پرمصرف از ریشه به اندام هوایی نهال‌های نارنجی انشو میاگاوا با پایه نارنج.

Fig 7. Mean translocation coefficient of macronutrients from roots to shoots in 'Anshu Miyagawa' mandarin seedlings grafted onto sour orange rootstock.

## غلظت عناصر کم‌مصرف در برگ و ریشه

نتایج میانگین غلظت آهن کل، آهن فعال، منگنز، روی و مس در ریشه و برگ نهال‌های نارنگی انشو با پایه نارنج در (جدول‌های ۸ و ۹) نشان داده شده است. نتایج میانگین غلظت آهن فعال در ریشه و برگ نشان داد که غلظت آهن فعال در برگ و ریشه در خاک‌های مختلف متفاوت بود به طوری که کمترین غلظت آهن فعال ریشه در خاک ۳ با آهک ۱۴ درصد حاصل شد که ۱۴ میلی‌گرم در کیلوگرم بود؛ اما بیشترین غلظت آهن فعال ریشه از خاک پنج با بافت لوم سنی و آهک ۳۰ درصد حاصل شد که ۵۵ میلی‌گرم در کیلوگرم بود که نشان می‌دهد غلظت آهن فعال در برگ و ریشه تحت تأثیر ویژگی‌های خاک قرار می‌گیرد. به‌طور کلی میانگین غلظت آهن فعال در ریشه معادل میانگین آن در برگ بود که حدود ۳۱/۸۶ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. میانگین غلظت آهن کل در ریشه‌ها ۱۷۲۰ و در برگ‌ها ۱۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم بود که نشان می‌دهد میانگین غلظت آهن کل در ریشه انتقال آهن کل و فعال نشان داد که آهن کل کمترین ضریب انتقال و آهن فعال بیشترین ضریب انتقال از ریشه به اندام هوایی را دارد (شکل ۸). این تفاوت در ضریب انتقال نشان می‌دهد که بیشتر آهن جذب شده از خاک‌ها در ریشه‌ها تجمع یافته است که با نتایج دیگر پژوهشگران در خاک‌های آهکی مطابقت دارد که گزارش کردند بیشتر آهن جذب شده در آپوپلاست سلول‌های ریشه ذخیره می‌شود (Martinez-Guenca et al., 2017; Morales et al., 1998). نتایج این پژوهش نشان داد که رابطه معنی‌داری بین مقدار آهن قابل‌استفاده خاک با غلظت آهن در ریشه و برگ وجود نداشت همچنین بین غلظت آهن در ریشه با غلظت آهن در برگ رابطه معنی‌داری وجود نداشت که نشان داد که غلظت آهن کل نمی‌تواند شاخص مناسبی برای تشخیص حد مطلوب غلظت در برگ برای این پایه باشد و نتایج این پژوهش با نتایج دیگر گزارش‌های پژوهشی مطابقت دارد (Asadi, 2018; Martinez-Guenca et al., 2017). بنابراین، اندازه‌گیری مقدار آهن قابل‌استفاده در خاک (به روش DTPA)، شاخص مناسبی برای پیش‌بینی قابلیت استفاده آهن و پیش‌بینی درجه زرد برگی در درختان مرکبات یا حداقل در این پایه و پیوندک نیست. براساس نتایج این پژوهش حدود ۱/۸۵ درصد آهن ریشه و ۲۷/۵۹ درصد آهن برگ به شکل آهن فعال است که نشان می‌دهد بیشتر از ۹۸ درصد آهن در ریشه و ۷۲ درصد آن در برگ‌ها از نظر فیزیولوژی و بیوشیمیایی به شکل

غیرقابل استفاده هستند که اصطلاحاً تضاد آهن نامیده می‌شود (Arbona et al., 2009; Salisbury and Ross, 1992; Romheld, 2000). کمبود آهن در اوایل رشد در هنگام ظاهر شدن فلش‌های بهاره، موجب کاهش روند رشد برگ‌های جدید و در نتیجه کاهش اندازه برگ‌ها می‌شود و اغلب موجب بروز علائم زردی نخواهد شد؛ اما اگر کمبود آهن در هنگام توسعه برگ‌ها رخ دهد موجب کاهش غلظت کلروفیل و زردی می‌شود. بنابراین در خاک‌های آهکی، کاهش اندازه برگ‌ها و ریز بودن آن‌ها از علائم کمبود آهن است (Castle and Nunnallee, 2009; Martinez-Guenca et al., 2017).

نتایج میانگین غلظت منگنز نشان داد که ریشه‌ها در خاک دو و شش بیشترین غلظت منگنز را داشتند و به ترتیب غلظت منگنز آن‌ها ۹۰ و ۹۲ میلی‌گرم در کیلوگرم بود در مقابل غلظت منگنز برگ آن‌ها به ترتیب ۱۵ و ۷/۷ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. میانگین غلظت منگنز برگ در همه خاک‌ها پایین بود، به طوری که میانگین آن در خاک‌های مختلف از ۷/۷ تا ۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم متغیر بود که کمتر از غلظت بهینه منگنز در برگ نارنگی های انشو است (Asadi Kangarshahi, 2019). به‌طور کلی، میانگین غلظت منگنز در ریشه نارنگی انشو با پایه نارنج در خاک‌های مختلف ۷۰/۵۷ میلی‌گرم در کیلوگرم و در برگ ۱۱/۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بود که نشان می‌دهد میانگین غلظت منگنز در ریشه ۶/۱۴ برابر میانگین غلظت منگنز برگ است. نتایج این پژوهش نشان داد که غلظت منگنز در برگ نارنگی انشو با پایه نارنج در همه خاک‌های آزمایشی کمتر از حد بهینه بود.

بیشترین میانگین غلظت روی در برگ از خاک‌های ۲ و ۶ حاصل شد. در ریشه، بیشترین غلظت روی از خاک ۵ با آهک ۴۰ درصد حاصل شد. میانگین غلظت روی در ریشه و برگ در خاک‌های مختلف به ترتیب حدود ۷۶/۶۱ و ۲۳/۷۱ میلی‌گرم در کیلوگرم بود که نشان می‌دهد میانگین غلظت روی در ریشه حدود ۳/۲۳ برابر میانگین غلظت روی در برگ است. نتایج میانگین غلظت مس در ریشه و برگ نشان می‌دهد که ریشه‌ها در خاک‌های ۵ و ۷ بیشترین غلظت مس (۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) داشتند. کمترین غلظت مس در ریشه حدود ۲۱ میلی‌گرم در کیلوگرم بود که از خاک ۶ با آهک ۲۵ درصد حاصل شد؛ اما بیشترین و کمترین غلظت مس در برگ به ترتیب ۱۵/۶ و ۲/۷ میلی‌گرم در کیلوگرم بود که در خاک‌های با آهک ۲۵ و ۲ درصد حاصل شد. به‌طور کلی، میانگین غلظت مس در ریشه حدود ۳/۶۲ برابر میانگین غلظت مس در برگ بود. میانگین ضرایب انتقال عناصر کم‌مصرف

قرار دارند (مانند برخی خاک‌های مناطق جنگلی شرق مازندران در شیب تپه‌ها که تبدیل به باغ شده‌اند). خاک‌های رسی و سیلتی رسوبی و همچنین خاک‌های باتلاقی با آهک زیاد (مانند برخی خاک‌های مناطق میانه و شرق مازندران و همچنین خاک‌هایی که زمانی آب‌بندان بوده‌اند) و خاک‌های آهکی با مواد آلی زیاد و زهکشی ضعیف (بیشتر خاک‌های شرق مازندران) مشاهده می‌شود گزارش‌ها ( Srivastava and Singh, 2003; Asadi ) (Kangarshahi and Akhlaghi Amiri, 2014). نتایج مطالعات شبکه‌ای خاک‌های مازندران نیز نشان داد که مقدار منگنز قابل استفاده، در خاک بیشتر باغ‌های مرکبات بیش از حد کفایت است. ولی در مقابل، غلظت منگنز در برگ اکثر این باغ‌ها کمتر از حد کفایت است و علائم کمبود آن در اکثر باغ‌ها به وضوح مشاهده می‌شود. همچنین Asadi Kangarshahi و Mahmoudi (۲۰۰۰) گزارش کردند که غلظت منگنز در برگ حدود ۶۰ درصد باغ‌های مرکبات منطقه شرق مازندران در دامنه کمبود قرار داشت و آن را به عنوان یکی از عوامل محدودکننده تولید در منطقه ذکر کردند. نتایج پژوهش‌های Asadi Kangarshahi (۲۰۱۹) نشان داد که مصرف سولفات منگنز به صورت چالکود قبل از توسعه برگ‌ها تأثیر معنی‌داری بر غلظت منگنز ریشه، برگ، میوه و همچنین عملکرد درختان مرکبات ندارد بنابراین مصرف خاکی آن در به شکل کودپایه در اسفندماه توصیه نمی‌شود؛ اما مصرف سولفات منگنز به صورت محلول‌پاشی و کودآبیاری موجب افزایش معنی‌داری در غلظت منگنز برگ، میوه و همچنین عملکرد میوه نسبت به شاهد شد؛ بنابراین در باغ‌های که علائم خفیف کمبود منگنز دارند یا احتمال کمبود منگنز دارند مصرف یک‌بار سولفات منگنز به صورت کودآبیاری یا محلول‌پاشی پس از ریزش گلبرگ‌ها در مرحله اول رشد میوه توصیه می‌شود؛ اما باغ‌های که علائم شدید کلروز منگنز دارند نیاز به دو بار کودآبیاری یا محلول‌پاشی سولفات منگنز (مرحله اول پس از ریزش گلبرگ‌ها در مرحله اول رشد میوه و مرحله دوم در تابستان در مرحله دوم رشد میوه قبل از شروع رشد فلش های پاییزی) دارند ( Asadi Kangarshahi, 2019; Asadi ) (Kangarshahi and Akhlaghi Amiri, 2025).

در خاک‌های مختلف نشان داد که ضریب انتقال عناصر روی، مس، منگنز و آهن کل به ترتیب پس از آهن فعال قرار داشتند و دامنه این میانگین ضرایب انتقال برای عناصر کم‌مصرف از ۰/۰۸ تا ۱/۱۲ متغیر بود (شکل ۷).

بر اساس نتایج این پژوهش، بین قابلیت استفاده منگنز در خاک با غلظت آن در ریشه و برگ و همچنین بین غلظت منگنز در ریشه با غلظت آن در برگ رابطه معنی‌داری وجود ندارد. لذا می‌توان نتیجه‌گیری کرد که کمبود منگنز در برگ درختان مرکبات شمال کشور، به علت کمبود منگنز در خاک نیست، بلکه ناشی از انتقال منگنز از ریشه به اندام هوایی است که با وجود غلظت زیاد منگنز در خاک و ریشه، غلظت منگنز برگ در همه خاک‌ها در دامنه کمبود قرار داشت که با گزارش‌های Asadi Kangarshahi (۲۰۱۹) و Asadi Kangarshahi و Akhlaghi Amiri (۲۰۲۰) مطابقت دارد. نتایج این پژوهش با نتایج پژوهش‌های Asadi Kangarshahi و همکاران (۲۰۰۲)، Asadi Kangarshahi و Mahamoudi (۲۰۰۰)، Khoei (۱۹۸۱) و Anonymous (۱۹۸۱) مطابقت دارد که گزارش کردند اغلب مرکبات منطقه شرق مازندران کمبود پنهان و آشکار منگنز دارند. نتایج پژوهش‌های Asadi Kangarshahi و Akhlaghi Amiri (۲۰۱۷) نشان داد که با وجود این که مقدار منگنز قابل استفاده در همه خاک‌های آزمایشی بیشتر از حد مطلوب بود اما غلظت منگنز در برگ اغلب درختان کمتر از حد بهینه بود، این شرایط در مطالعات میدانی در خاک‌های تحت کشت مرکبات در شرق مازندران نیز گزارش شده است ( Therani et al., 2011; Asadi Kangarshahi and Akhlaghi Amiri, 2017). همچنین نتایج این آزمایش با نتایج برخی گزارش‌های دیگر مطابقت دارد که اظهار داشتند میانگین غلظت منگنز در ریشه نارنگی انشو میاگاوا با پایه سونینگل سیتروملو در خاک‌های مختلف حدود ۳/۲ برابر غلظت آن در برگ است ( Asadi Kangarshahi and Akhlaghi Amiri, 2017). برخی مطالعات نشان دادند که کمبود منگنز اغلب در خاک‌های کم‌عمق با مواد آلی زیاد که بالای خاک‌های آهکی

جدول ۸- میانگین غلظت عناصر کم مصرف (میلی گرم بر کیلوگرم وزن خشک) در برگ نهال‌های انشو (پایه نارنج) در هفت خاک مختلف.  
**Table 8. Mean micronutrient concentrations (mg kg<sup>-1</sup> dry weight) in the leaves of 'Anshu' mandarin seedlings (sour orange rootstock) across seven different soils.**

غلظت عناصر کم مصرف در برگ (میلی گرم بر کیلوگرم بر اساس وزن خشک)* Leaf micronutrient concentrations (% of dry weight)*					خاک soil
مس Cu	روی Zn	منگنز Mn	آهن فعال active Fe	آهن Fe	
2.7 d	23 b	8.6 c	35 b	156 a	1
5.9 bc	26 a	7.7 c	35 b	104 c	2
5.6 bc	22 b	10.4 bc	34 b	82 d	3
5.6 bc	22 b	13.6 ab	45 a	144 ab	4
5.4 bc	23 b	11.9 b	37 b	95 cd	5
15.6 a	27 a	15 a	30 c	96 cd	6
8.16 b	23 b	13.4 ab	33 cb	131 b	7

\* میانگین‌های مربوط به هر ستون که دارای حروف لاتین مشترک هستند در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

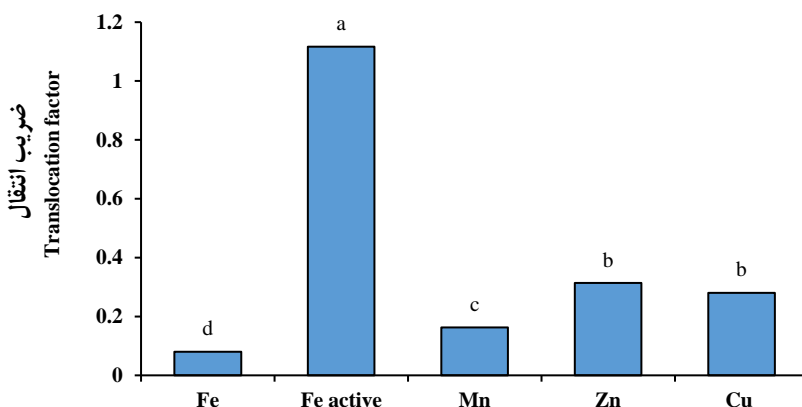
\* The averages for each column that have the same letters are not significantly different from each other at the 5% probability level.

جدول ۹- میانگین غلظت عناصر کم مصرف (میلی گرم بر کیلوگرم وزن خشک) در ریشه نهال‌های انشو (پایه نارنج) در هفت خاک مختلف.  
**Table 9. Mean concentrations of micronutrients (mg kg<sup>-1</sup> dry weight) in the roots of 'Anshu' seedlings (Citrus junos rootstock) grown in seven different soils.**

غلظت عناصر کم مصرف در ریشه (میلی گرم بر کیلوگرم بر اساس وزن خشک)* Root micronutrient concentrations (% of dry weight)*					خاک soil
مس Cu	روی Zn	منگنز Mn	آهن فعال active Fe	آهن Fe	
22.4 b	9.69 c	62 c	20 cd	1519 b	1
22.2 b	75.4 bc	93 a	40 b	1571 b	2
22.2 b	54 d	43 d	14 d	2185 a	3
28.2 ab	61 cd	61 c	31 c	2039 a	4
30.3 a	110 a	66 bc	55 a	1290 c	5
21.5 b	84 b	90 a	16 d	1556 b	6
30.2 a	82 b	79 b	47 ab	1586 b	7

\* میانگین‌های مربوط به هر ستون که دارای حروف لاتین مشترک هستند در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

\* The averages for each column that have the same letters are not significantly different from each other at the 5% probability level.



شکل ۸- میانگین ضریب انتقال عناصر کم مصرف از ریشه به اندام هوایی نهال‌های نارنگی انشو میاگاوا با پایه نارنج.

**Fig 8. Mean translocation factors (TF) of micronutrients from roots to shoot in 'Anshu Miyagawa' mandarin seedlings (Citrus junos rootstock).**

### نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، تأثیر زیادی در پاسخ‌های تغذیه‌ای و فیزیولوژیکی نارنگی انشو با پایه نارنج دارد. به طوری که بیشترین میانگین وزن خشک اندام هوایی در خاک‌های با آهک کل ۳۰ درصد حاصل شد. عناصر فسفر، گوگرد، آهن، منگنز، روی و مس ضریب انتقال (از ریشه به برگ) کمتر از یک داشتند که نشان می‌دهد این عناصر تحرک کمتری دارند و در ریشه انباشته می‌شوند. همچنین افزایش آهک فعال، تأثیر معنی‌داری بر غلظت آهن فعال و درجه زردی

برگ نهال‌های روی این پایه نداشت. مقدار آهک خاک نیز تأثیر معنی‌داری بر شاخص زرد برگی نهال‌ها در خاک‌های مختلف نداشت. بنابراین، براساس نتایج این پژوهش، پایه نارنج متحمل به آهک خاک است و برای خاک‌های آهکی منطقه شرق مازندران به‌ویژه در خاک‌های با بافت سنگین و آهک زیاد توصیه می‌شود؛ اما استفاده از آن در خاک‌های با بافت سبک و همچنین خاک‌های مستعد کمبود منگنز (که احتمال ظهور علائم کمبود منگنز وجود دارد) توصیه نمی‌شود.

## References

1. Abadia, J. and Abadia, A. 1993. Iron and plant pigments. In: Barton, L.L. and Hemming, B.C., eds. Iron chelation in plants and soil microorganisms. New York, Academic Press, 327-343.
2. Anonymous. 1974. Research reports of Mazandaran Fertility and Soil Science Department. Soil and Water Research Institute, Tehran, Iran. (In persian)
3. Arbona, V., Lopez-Climent, M.F., Perez-Clement, R.M. and Gomez-Cadenas, A. 2009. Maintenance of a high photosynthetic performance is linked to flooding tolerance in citrus. *Environmental and Experimental Botany*. 66: 135 – 142.
4. Arnon, D.I. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplast-polyphenoloxidase in *Beta-vulgaris*. *Plant Physiol*. 24: 1- 15.
5. Asadi Kangarshahi, A. 2019. Study of Manganese Status and Management According to Growth Stages and Its Effect on the Yield and Quality of Citrus in East of Mazandaran. *Soil Research*, 33 (3), pp. 321-334. DOI: 10.22092/IJSR.2019.116581.325. (In persian)
6. Asadi Kangarshahi, A. and Mahmoudi, M. 1990. The necessity of using zinc and manganese elements in citrus orchards in eastern Mazandaran. *Soil and Water Research (Horticulture Special)*, 12 (8), pp. 465-470. (In persian)
7. Asadi Kangarshahi, A. and Akhlaghi Amiri, N. 2025. The importance of soil properties in orchards construction and nutrition of immature citrus trees. Handbook No. 67265. Soil and Water Research Institute, Karaj, Iran. (In persian)
8. Asadi Kangarshahi, A. and Akhlaghi Amiri, N. 2014. *Advanced and Applied Citrus Nutrition*, (I). Agricultural Extension and Education Publications. (In persian)
9. Asadi Kangarshahi, A. and Akhlaghi Amiri, N. 2017. Growth trend, nutritional responses (microelements) and chlorosis degree of Swingle citromelo in calcareous soils of east of Mazandaran. *Soil Research*, 31 (2), pp. 177-195. DOI: 10.22092/IJSR.2017.113099. (In persian)
10. Asadi Kangarshahi, A. and Akhlaghi Amiri, N. 2020. Evaluation of growth rate and vegetative and physiological characteristics of Satsuma mandarin on C-35 rootstock in some calcareous soils. *Soil Research*, 34 (2), pp. 215-234. DOI: 10.22092/IJSR.2020.122521. (In persian)
11. Asadi Kangarshahi, A. and Akhlaghi Amiri, N. 2022. Evaluation of vegetative, physiological and chlorosis characteristics of Satsuma mandarin on Carrizo citrange in some calcareous soils. *Soil Research*, 36 (1), pp. 47-68. DOI: 10.22092/IJSR.2022.126890. (In persian)
12. Asadi Kangarshahi, A. and Akhlaghi Amiri, N. 2022. Physiological and Nutritional Responses of Satsuma Mandarin on Gou Tou (*Citrus aurantium* L. var. Gou Tou) in Calcareous Soils. *Soil Research*, 38 (3), pp. 225-250. DOI: 10.22092/IJSR.2024.366158.749 (In persian)
13. Asadi Kangarshahi, A. and Akhlaghi Amiri, N. 2022. Physiological and nutritional responses of Satsuma mandarin on Smooth flat seville in some calcareous soils. *Soil Research*, 36 (4), pp. 370-389. DOI: 10.22092/IJSR.2023.360671.686. (In persian)
14. Asadi Kangarshahi, A. and Akhlaghi Amiri, N. 2015. Investigation of the Chlorosis Degree index of different citrus rootstocks in calcareous soils of eastern Mazandaran. 14th Iranian Soil Science Congress. Vali-Asr University of Rafsanjan, Kerman, Iran. (In persian)
15. Asadi Kangarshahi, A. 2018. Growth trend, nutritional responses and tolerance of Teroyer citrange in calcareous soils. *Land Management*, 6 (2), pp. 195-212. DOI: 10.22092/LMJ.2019.118338. (In persian)
16. Asadi Kangarshahi, A. 2019. *Nutrition Management of Citrus Trees* (1<sup>th</sup> ed.). Agricultural Extension and Education Publications. (In persian)
17. Asadi Kangarshahi, A., Sawaqebi, G.R., Samar, M. and Farahbakhsh, M. 2013. The possibility of using chlorophyll fluorescence to evaluate the tolerance of some citrus rootstocks to waterlogging stress. *Agricultural Sciences*, 15 (4), pp. 65-78. (In persian)
18. Asadi Kangarshahi, A., Akhlaghi Amiri, N. and Fallah, A.R. 2019. Guide to sampling and interpretation of soil and leaf analysis results for citrus trees. Technical publication number 561. Soil and Water Research Institute, Karaj, Iran. (In persian)
19. Asadi Kangarshahi, A., Akhlaghi Amiri, N., Mahmoudi, M. and Malkouti, M.J. 2001. Recognition of nutritional disorders in Mazandaran citrus orchards (restrictions and recommendations), II: microelements. Technical publication number 269. Agricultural education publication. (In persian)
20. Asadi Kangarshahi, A., Akhlaghi Amiri, N., Samar, M. 2015. Possibility of using chlorosis degree and active Iron (Fe<sup>2+</sup>) to

- assess the tolerance of some citrus rootstocks to calcareous soils. *Soil Research*, 29 (2), pp. 269-284. DOI: 10.22092/IJSR.2015.103433. (In persian)
21. Basar, H. 2003. Analytical methods for evaluating chlorosis in peach trees. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*. 34: 327-341.
  22. Bashour, I. and Sayegh, A.A. 2007. *Methods of Analysis for Soils of Arid and Semi-Arid Regions*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. P. 49-53.
  23. Belkhdja, R., Morales, F., Abadia, A., Gomes, J. and Abadia, J. 1994. Chlorophyll fluorescence as a possible tool for salinity tolerance screening in Barley (*Hordeum vulgare L.*). *Plant Physiol*. 104: 667-673.
  24. Bowman, K.D. and Joubert, J. 2020. Citrus Rootstocks. In: Talon, M., Caruso, M. and Gmitter, F.G. (Eds), *The Genus Citrus*. Woodhead Publishing. pp. 105-127..
  25. Bremner, J.M. 1996. Total Nitrogen. P.1085-1122. In: D. L. Sparks et al. (eds.) *Methods of soil analysis*. American Society of Agronomy, Madison, WI.
  26. Byrne, D.H., Rouse, R.E. and Sudahono, J. 1995. Tolerance to citrus rootstocks to lime-induced iron chlorosis. *Subtrop. Plant Science*. 47: 7 – 11.
  27. Cambra, M., Gorris, M.T., Marroquin, C., Roman, M.P., Olmos, A., Martinz, M.C., Mendoza, A.H. and Lopez, A. 2000. Incidence and epidemiology of citrus tristeza virus in the Valencian community of Spain. *Virus Research*. 71: 85 – 95.
  28. Caruso, M., Giuffrida, A. and Malfa, S.L. 2024. Rootstocks for the Mediterranean citrus industry: current choices and new releases. *Italus Hortus*. 31:1-17.
  29. Castle, W.S., Pelos, R.R., Youtsey, C.O., Gmitter, F.G., Lee, R.F., Pwell, C.A. and Hu, X. 1992. Rootstocks similar to Sour orange for Florida citrus trees. *Proc. Fla. State Hort. Soc.* 105: 56-60.
  30. Castle, W.S. and Nunnallee, J. 2009. Screening citrus rootstocks and related selections in soil and solution culture for tolerance to low-iron stress. *HortScience*. 44: 638-645.
  31. Castle, W.S., Baldwin, J.C. and Muraro, R.P. 2010. Rootstocks and the performance and economic returns of 'Hamlin' sweet orange trees. *HortScience*. 45: 875-881.
  32. Continella, A., Modica, G., Tribulato, A., La Malfa, S. and Gentile, A. 2023. 11-year survey of yield and fruit quality of blood orange as affected by rootstock. *Acta Horticulturae*. 1366: 131-138.
  33. Fadl, A., El-Otmani, M., Benismail, M.C., Abouatallah, A. and Jaouhari, E. 2008. Optimizing irrigation water supply in a young citrus orchard. *Proceeding of The 11<sup>th</sup> International Society of Citriculture*. pp. 573 – 578.
  34. Forner-Giner, M.A., Continella, A. and Grosser, J.W. 2020. Citrus Rootstock Breeding and Selection. In: A. Gentile, S. La Malfa, Z. Deng (eds) *The Citrus Genome. Compendium of Plant Genomes*, Springer, Cham, pp. 49-74.
  35. Gee, G.W. and Bauder, J.W. 1986. Particle size analysis. P. 383 – 411. In: A. Klute, (ed.) *Methods of Soil Analysis*. Part1. SSSA, Madison, WI.
  36. Hippler, R., Cipriano, D.O., Boaretto, R.M., Quaggio, J.A., Gaziola, S.A., Azevedo, R.A., Mattos-Jr, D. 2016. Citrus rootstocks regulate the nutritional status and antioxidant system of trees under copper stress. *Environmental and Experimental Botany*. 130: 42-52.
  37. Hussain, S., Curk, F., Dhuique-Mayer, C., Urban, L., Ollitrault, P., Luro, F., Morillon, R. 2012. Autotetraploid trifoliolate orange (*Poncirus trifoliata*) rootstocks do not impact clementine quality but reduce fruit yields and highly modify rootstock/scion physiology. *Sci. Hort.* 134, 100–107.
  38. Hussain, S., Sohail, H., Noor, I., Ahmad, S., Ejaz, S., Ali, M.A. and Khalid, M. F. 2023. Physiological and biochemical determinants of drought tolerance in tetraploid vs diploid sour orange citrus rootstock. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. 8: 1-14.
  39. Ibrahim, A.S. 2020. Growth and Yield of orange (Washington Navel) grafted on different citrus rootstocks. *Agricultural Science and Technology*. 12: 247-254.
  40. Incesu, M., Yesiloglu, T., Tuzcu, O., Cimen, B. and Yilmaz, B. 2016. Response of citrus rootstocks to iron deficiency under high PH conditions. *Citrus Research and Technology*. 37: 66-75.
  41. Izadpanah, B. 1976. Semi-comparative and general studies of soil science and land classification of Mazandaran province. Publication No. 492. Soil and Water Research Institute, Agricultural Research and Education Organization, Tehran, Iran. (In persian)
  42. Jones, J.B., Wolf, B. and Mills, H.A. 1991. *Plant Analysis Handbook: A Practical Sampling, Preparation, Analysis and Interpretation Guide*. Macro-Micro Pub. Inc., Athens, GA.
  43. Khoei, S.. 1991. *Principles of Citrus Nutrition*. Ministry of Culture and Islamic

- Guidance. Tehran, Iran. pp. 281. (In persian)
44. Khoei, S. 1981. Study of the nutritional status of citrus trees in eastern Mazandaran. Publication No. 648, Soil and Water Research Institute, Tehran, Iran. (In persian)
  45. Kitson, R.E. and Mellon, M.G. 1944. Colorimetric determination of P as a molybdovanadate phosphoric acid. *Ind. Eng. Chem. Anal. Ed.* 16: 379-383.
  46. Larbi, A., Abadia, A., Abadia, J. and Morales, M. 2006. Down co-regulation of light absorption, photochemistry and carboxylation in Fe-deficient plants growing in different environment. *Photosynth. Res.* 89: 113-126.
  47. Lindsay, W.L. and Norvel, W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Science Society of America Journal.* 42: 421-428.
  48. Loeppert, R.H., Wei, L.C. and Ocumpaugh, W.R. 1994. Soil factors influencing the mobilization of iron in calcareous soils. In: Manthey, J.A., Crowley, D.A., Luster, D.G. (Eds.), *Biochemistry of Metal Micronutrients in the Rhizosphere.* Lewis Publishers. Boca Raton. PP. 343 – 360.
  49. Louzada, E.S., Rio, Setamou, H.S., M., Watson, J.W. and Swietlik, D.M. 2008. Evaluation of citrus rootstocks for the high pH, calcareous soils of South Texas. *Euhytica.* 164: 13 – 18.
  50. Martínez-Cuenca, M. R., Primo-Capella, A. and Forner-Giner, M.Á. 2021. Screening of 'King' mandarin hybrids as tolerant citrus rootstocks to flooding stress. *Horticulturae.* 7: 388-396.
  51. Martinez-Cuenca, M.R., Forner-Giner, M.A., Iglesias, D.J., Primo-Millo, E. and Legaz, F. 2013. Strategy I responses to Fe-deficiency of two citrus rootstocks differing in their tolerance to iron chlorosis. *Scientia Horticulturae* 153:56–63.
  52. Martinez-Guenca, M.R., Primo-Capella, A., Quinones, A., Bermejo, A. and Forner-Giner, M.A. 2017. Rootstock influence on iron uptake responses in citrus leaves and their regulation under the Fe paradox effect. *Peer J.* 5:e3553 <https://doi.org/10.7717/peerj.3553>
  53. Maxwell, K. and Johnson, G.N. 2000. Chlorophyll fluorescence: a practical guide. *Journal of Experimental Botany.* 51: 659-668.
  54. Mclean, E.O. 1982. Soil pH and lime requirement. P. 199- 224. In: A.L. Page et al. (ed.), *Methods of Soil Analysis.* Part 2. SSSA. Madison, WI.
  55. Mengel, K. 1995. Iron availability in plant tissues-iron chlorosis in calcareous soils, In: J. Abadia (Ed.), *Iron Nutrition in Soils and Plant.* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands. 389-397.
  56. Mengel, K. and Kirkby, E. 2001. *Principles of plant nutrition.* 5<sup>th</sup> edition, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands.
  57. Mishra, A., Mishra, K.B., Hoermiller, H., Heyer, A.G. and Nedbal, L. 2011. Chlorophyll fluorescence emission as a reporter on cold tolerance in Arabidopsis thaliana accession. *Plant Signaling and Behavior.* 6: 301-310.
  58. Morales, F., Grasa, R., Abadia, A. and Abadia, J. 1998. Iron chlorosis paradox in fruit trees, *Journal of Plant Nutrition.* 24: 815-825.
  59. Neaman, A. and Aguirre, L. 2007. Comparison of different methods for diagnosis of iron deficiency in avocado. *Journal of Plant Nutrition.* 30: 1098 – 1108.
  60. Nelson, D.W. and Sommers, L.E. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. P. 539 – 579. In: A.L. Page et al. (eds.), *Methods of Soil Analysis.* Part II. 2<sup>th</sup> ed. ASA, SSSA, Madison, WI.
  61. Olsen, S.R. and Sommers, L.E. 1982. Phosphorus. In: A.L. Page et al., (Ed.), *Methods of Soil Analysis.* Part 2. Monograph no 9. (pp. 403-430). American Agronomy, Madison, WI.
  62. Pestana, M., David, M., de Varennes, A., Abadia, J. and Faria, E.A. 2001. Responses of Newhall orange trees to iron deficiency in hydroponics: effects on leaf chlorophyll, photosynthetic efficiency and root ferric chelate reductase activity. *Journal of Plant Nutrition.* 24: 1609-1620.
  63. Rahimian, H., Alavi, S.V., Shaygan, J. and Hadizadeh, A. 1990. Transmission of citrus tristeza virus (CTV) by green aphid in northern Iran. *Journal of Plant Diseases,* 355 (1), pp. 31-40. (In persian)
  64. Romheld, V. 2000. The chlorosis paradox: Fe inactivation in leaves as a secondary event in Fe deficiency chlorosis. *Journal of Plant Nutrition.* 23:1629–1643.
  65. Salisbury, F.B. and Ross, C.W. 1992. *Plant Physiology.* Wadsworth Publishing Company, Belmont, California. 682 pp.
  66. Schneider, A. 1997. Release and fixation of potassium by a loamy soil as affected by initial water content and potassium status of soil samoles. *European Journal of Soil Science.* 48: 263 – 271.

67. Singh, A., Naqvi, S. and Singh, S. 2002. Citrus Germplasm Cultivar and Rootstocks. Natural Research Centre for Citrus, Kalyani publishers. New Delhi, India.
68. Smith, M., Gultzow, D.L., Reid, M., Huie, J.E. and Newman, T.K. 2024. Extreme hybrids from the Australian citrus rootstock breeding program. *Italus Hortus*. 31: 43-55.
69. Srivastava, A.K. and Singh, S. 2003. Citrus nutrition. International Book Distributing Co. (IBDC). India.
70. Tehrani, M.M., Pasandideh, M. and Davoodi, M.H. 2011. Determining the distribution and recommendation of trace elements in irrigated lands of the provinces of Gilan, Mazandaran, Hamadan, Kermanshah, West Azerbaijan and Isfahan. Ministry of Agricultural Jihad, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Soil and Water Research Institute. Final report of the research project. Publication No. 1618. Iran. (In persian)
71. Wright, R.J. and Stuczynski, T.I. 1996. Atomic absorption and flame emission spectroscopy. In: *Methods of Soil Analysis*. Sparks, D.L. (Ed.), Part III, Chemical Methods, SSSA Book Series No.5, SSSA, Madison, WI. P. 65-91.



## Chemical and Structural Properties of Humic Acid Extracted from Leonardites of Selected Mines in Kerman

Razieh Ahesteh<sup>a</sup>, Majid Hejazi-Mehrizi<sup>a\*</sup> , Naser Boroomand<sup>a</sup>, Mehdi Sarcheshmepour<sup>a</sup>, and Majid Fekri<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

### Article Info

#### Article Type

Research Article

#### Received

August 24, 2025

#### Revised

October 05, 2025

#### Accepted

October 26, 2025

#### Published online

December 20, 2025

#### Keywords

Humic acid,  
Spectrophotometric ratio,  
Elemental analysis,  
coal washing

#### \*Corresponding author's email

[mhejazi@uk.ac.ir](mailto:mhejazi@uk.ac.ir)

### Extended Abstract

**Background and Objectives:** Leonardites display considerable diversity in their structural and chemical properties, and a more detailed understanding of these characteristics can greatly contribute to a better appreciation of their potential applications in agriculture. Leonardite is a naturally oxidized mineral derived from lignite, distinguished by its high oxygen content and elevated levels of humic acids (40–80%), and is recognized as a primary source for humic acid (HA) extraction. The chemical structure of humic acid consists of aliphatic and aromatic chains bearing various functional groups, notably carboxyl and phenolic groups. These functional groups enable humic acid to interact effectively with metal ions and organic compounds, thereby enhancing the chemical and biological properties of soil. There is limited information regarding the chemical composition and humic acid extraction potential of leonardite deposits from the Pabdana area (Zarand) as well as the waste materials from the Zarand coal-washing plant. The present study was conducted to thoroughly investigate these resources with the aim of identifying indigenous potentials for the production of humic substances

**Methodology:** A total of 16 samples, including 13 leonardite; L1–L13 were collected from the Goltoot coal mine, and 3 coal-washing waste samples; C1–C3 were collected from Zarand coal washing factory. Fresh samples were air-dried, and their pH and electrical conductivity (EC) were measured in a 1:20 solid-to-liquid ratio (w/w). Humic acid extraction followed California Department of Food and Consumer Protection method (CDFA Method) California method. Briefly, 10 g of sample (<75 μm) was mixed with 0.1 M NaOH, agitated for 24 hours, filtered, acidified to pH 1–2, washed, and subsequently dried. The percentage of extracted HA was calculated as: (weight of extracted HA / weight of initial sample) × 100. An UV-Vis spectrophotometer was used to determine structural characteristic including E4/E6, E3/E5, and E2/E3. Based on results, 6 samples (C1, L1, L5, L7, L10, and L13) were selected for further evaluation. Humic acid was extracted from selected samples and their elemental CHNS analysis, pH, EC and FTIR spectroscopy (400–4000 cm<sup>-1</sup>) were investigated.

**Results:** The results revealed the differences among the initial samples in terms of humic acid extraction yield. The highest humic acid contents were recorded in samples L1 (64.6%), L2 (60.05%), L10 (60.07%), and L11 (62.35%). The E4/E6 ratio of C1 and L13 (0.12 and 0.58) exhibited more aromatical structures, whereas samples L3 and L6, with ratios of 3.93 and 3.88 displayed predominantly aliphatic structure. The E3/E5 ratio results showed that the highest value (5.07) was observed in sample L11, while the lowest value (0.78) was measured in sample L9. The pH of extracted HA varied from 1.50 (L6) to 7.10 (L9), and EC varied from 63 in C3 to 1035  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  in L6. The CHNS elemental analysis revealed that there is considerable variability in the C, H, O, N content of extracted HA from leonardite and coal washing waste. The infrared spectroscopy results indicated the presence of aromatic rings, aliphatic chains, and several key functional groups—including phenolic hydroxyl, carboxyl, and carbonyl—in the extracted humic acid.

**Conclusion:** In conclusion, leonardites from the Pabedana region, particularly samples L1, L2, L10, and L11, constitute promising sources for humic acid extraction, characterized by high yields and diverse chemical properties that support their application in sustainable agricultural practices.

---

**Cite this article:** Ahesteh, R., Hejazi Mehrizi, M., Boroomand, N., Sarcheshmehpour, M., and Fekri, M., 2025. Chemical and Structural Properties of Humic Acid from Leonardites in Kerman Mines. *Journal of Soil Research*, 39 (3), pp 345-359.




**DOI:** [10.22092/IJSR.2025.370831.792](https://doi.org/10.22092/IJSR.2025.370831.792)

**Publisher:** Soil Science Society of Iran

---



## بررسی ویژگی‌های شیمیایی و ساختاری اسید هیومیک استخراجی از لئوناردیت‌های برخی معادن کرمان

راضیه آهسته<sup>۱</sup>، مجید حجازی مهریزی<sup>۱\*</sup> , ناصر برومند<sup>۱</sup>، مهدی سرچشمه‌پور<sup>۱</sup> و مجید فکری<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
<b>نوع مقاله:</b> مقاله پژوهشی	لئوناردیت‌ها از لحاظ ساختار و ویژگی‌های شیمیایی طیف گسترده‌ای دارند و شناخت دقیق‌تر این ویژگی‌ها می‌تواند به درک بهتر کاربردهای بالقوه آن‌ها در کشاورزی کمک کند. در این پژوهش ویژگی‌های شیمیایی و ساختاری نمونه‌های لئوناردیت جمع‌آوری شده از معدن زغال‌سنگ گلتوت در منطقه پابدانا (زرنده کرمان) و سه نمونه باطله کارخانه زغال‌شویی (زرنده) بررسی شدند. در نمونه‌های اولیه، pH، EC، درصد اسید هیومیک و برخی نسبت‌های اسپکتروفومتری اسید هیومیک استخراجی اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که بین نمونه‌های اولیه از نظر میزان استخراج اسید هیومیک تفاوت وجود داشت و بیشترین میزان اسید هیومیک در نمونه‌های L1 (۶۴/۶)، L2 (۶۰/۰۵)، L10 (۶۰/۰۷) و L11 (۶۲/۳۵) اندازه‌گیری شد. تحلیل ساختاری نشان داد که نمونه‌های C1 و L13 با نسبت آلیفاتیک به آروماتیک (E4/E6) به ترتیب ۰/۱۲ و ۰/۵۸ ساختار آروماتیک‌تر و نمونه‌های L3 و L6 با نسبت‌های ۳/۹۳ و ۳/۸۸ ساختار آلیفاتیک‌تری دارند. نتایج E3/E5 نیز نشان داد که بیشترین مقدار این نسبت (۵/۰۷) در نمونه L11 و کمترین مقدار (۰/۷۸) در نمونه L9 اندازه‌گیری شد. بر اساس این نتایج، نمونه‌های لئوناردیت شامل L1، L5، L7، L10، L13 به همراه یک نمونه یک ماهه باطله زغال‌شویی به‌عنوان نمونه‌های منتخب مورد ارزیابی بیشتری قرار گرفتند. در نمونه‌های منتخب، علاوه بر میزان استخراج اسید هیومیک، FTIR، ترکیب عنصری، EC و pH اسید هیومیک استخراجی بررسی و بر اساس نتایج آن‌ها، لئوناردیت‌های معادن منطقه پابدانا به دلیل تنوع ساختاری و غنای اسید هیومیک، منبعی ارزشمند برای استخراج اسید هیومیک شناخته شدند، در حالی که باطله‌های زغال‌شویی پتانسیل مناسبی جهت استخراج اسید هیومیک نشان ندادند.
<b>تاریخ دریافت:</b> ۱۴۰۴/۰۶/۲۲	
<b>تاریخ بازنگری:</b> ۱۴۰۴/۰۷/۱۳	
<b>تاریخ پذیرش:</b> ۱۴۰۴/۰۸/۰۴	
<b>تاریخ انتشار:</b> ۱۴۰۴/۰۹/۲۹	
<b>واژه‌های کلیدی</b> اسید هیومیک، نسبت‌های اسپکتروفومتری، آنالیز عنصری، زغال‌شویی	
<b>ایمیل نویسنده مسئول</b> <a href="mailto:mhejazi@uk.ac.ir">mhejazi@uk.ac.ir</a>	

استناد: آهسته، ر.، حجازی مهریزی، م.، برومند، ن.، سرچشمه‌پور، م.، فکری، م.، ۱۴۰۴. بررسی ویژگی‌های شیمیایی و ساختاری اسید هیومیک

استخراجی از لئوناردیت‌های برخی معادن کرمان. مقاله پژوهشی، نشریه پژوهش‌های خاک، (۳) ۳۹، ص ۳۴۵-۳۵۹.

DOI: 10.22092/IJSR.2025.370831.792



## مقدمه

لئوناردیت یک ماده معدنی طبیعی اکسید شده از لیگنیت با محتوای بالای اکسیژن و اسیدهای هیومیک (۸۰-۴۰ درصد) است، که به‌عنوان منبعی کلیدی برای استخراج اسید هیومیک شناخته می‌شود (Stevenson, 1994, Trckova et al., 2018). یکی از انواع لئوناردیت لیچه<sup>۱</sup> نام دارد که به‌دلیل محتوای بالای اسید هیومیک، به‌عنوان ترکیب اصلاح‌کننده خاک و محرک زیستی<sup>۲</sup> برای گیاهان استفاده می‌شود (Canellas and Olivares, 2014). این ماده آلی می‌تواند در بهبود ساختمان خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب و کاهش جذب فلزات سنگین توسط گیاهان در خاک‌های آلوده تأثیر داشته باشد (Arquetopanyo et al., 2018) از لئوناردیت، به‌ویژه نوع لیچه، می‌توان برای استخراج اسید هیومیک با بازده بالا استفاده کرد که کاربردهای گسترده‌ای در کشاورزی پایدار دارد.

اسیدهای هیومیک معمولاً با استفاده از محلول‌های قلیایی مانند هیدروکسید سدیم، آزاد و با اسیدی کردن محلول، استخراج می‌شوند (Stevenson, 1994). ساختار شیمیایی اسید هیومیک، شامل زنجیره‌های آلیفاتیک و آروماتیک با گروه‌های عاملی نظیر کربوکسیل و فنولی بوده که به آن قابلیت تعامل با یون‌های فلزی و مواد آلی را می‌دهد و این امر سبب بهبود خصوصیات شیمیایی و زیستی خاک خواهد شد (Tan, 2014). این ویژگی‌ها، اسید هیومیک را به ابزاری مؤثر برای افزایش فراهمی عناصر غذایی، کاهش شوری خاک و جذب فلزات سنگین در خاک‌های آلوده تبدیل کرده است (Fuentes et al., 2018). Qin و هم‌کاران (۲۰۲۰) با تحلیل مولکولی اسید هیومیک استخراج شده از لئوناردیت و منابع رودخانه‌ای نشان دادند که ترکیبات حاوی هترواتم‌های بیشتر، مانند نیتروژن و گوگرد، از اشباع ناپذیری و ویژگی‌های آروماتیک بالاتری برخوردارند، هرچند تغییرات pH و هدایت الکتریکی در خاک‌های کربنات‌دار طی دوره‌های کوتاه انکوباسیون (مانند سه ماه) اغلب ناچیز است. به همین ترتیب، Fuentes و هم‌کاران (۲۰۱۸) ویژگی‌های شیمیایی مشابه اسید هیومیک حاصل از ورمی‌کمپوست و لئوناردیت را بررسی کرده و بر توانایی این مواد در بهبود تعادل عناصر غذایی در خاک‌های کشاورزی تأکید نمودند. از سوی دیگر، Giovanela و هم‌کاران (۲۰۱۸) بر محتوای بالای گروه‌های عاملی در اسید هیومیک استخراج شده از کودهای آلی تأکید کرده و آن را عاملی کلیدی در افزایش فراهمی عناصر غذایی دانستند. در مطالعه انجام شده توسط

Kulikowska و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از طیف‌سنجی FTIR<sup>۳</sup> و همچنین روش تجزیه عنصری مشخص شد که لئوناردیت استخراج شده از معادن لهستان، دارای ۵۰ تا ۶۵ درصد کربن و گروه‌های عاملی کربوکسیل و هیدروکسیل می‌باشند.

استخراج اسید هیومیک از منابع مختلف آلی و معدنی با ترکیب دانش دیرین و فناوری‌های روز، به راه‌حلی پایدار و مقرون به‌صرفه برای تولید این ماده مهم تبدیل شده است. Meng و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که لئوناردیت با داشتن گروه‌های عاملی اسیدی مانند کربوکسیل و فنولیک، برای استخراج قلیایی-اسیدی بسیار مناسب بوده و بازدهی بالایی در مقیاس صنعتی داشت. Sarlaki و هم‌کاران (۲۰۲۰) با بهینه‌سازی شرایط استخراج (دما، زمان و سرعت هم‌زدن) در راکتورهای مکانیکی، بازده استخراج اسید هیومیک را تا حدود ۷۰ درصد افزایش دادند. Sarlaki و همکاران (۲۰۱۹) با بررسی ویژگی‌های طیفی، ساختاری و شیمیایی اسید هیومیک استخراج شده از زغال سنگ معادن ایران، نشان دادند که ناخالصی‌های معدنی نقش تعیین‌کننده‌ای در بازده استخراج (۴۰ تا ۶۰ درصد) دارند. از سوی دیگر، Sarlaki و همکاران (۲۰۲۴) گزارش کردند که روش‌های نوین استخراج هیدروترمال، لئوناردیت را به منبعی پایدار و کم‌هزینه برای تولید تجاری اسید هیومیک تبدیل می‌کند که با اهداف اقتصادی همخوانی دارد. در مطالعه Sarlaki و همکاران (۲۰۱۹)، لئوناردیت‌های منطقه تبریز با محتوای مناسب اسید هیومیک و کارایی بالای روش استخراج قلیایی-اسیدی، منبعی مناسب برای تولید صنعتی مواد هیومیکی شناخته شده‌اند. در مقابل، لیگنیت‌های ایرانی به دلیل وجود ناخالصی‌های معدنی بیشتر، بازده استخراج پایین‌تری دارند (Sarlaki et al., 2019). باطله‌های زغال‌شویی که عمدتاً شامل ذرات ریز زغال، خاک رس و مواد معدنی ناخواسته با محتوای پایین کربن (حدود ۲۲ درصد) و اکسیژن (۷ درصد) است (Singh et al., 2005). در مطالعه‌ی Heidarzadeh و همکاران (۲۰۱۳) باطله‌های زغال‌شویی کارخانه زغال‌شویی زرنند کرمان مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌برداری از محل دیوی باطله‌های زغال‌شویی انجام و آزمون‌های شیمیایی نشان داد که این باطله‌ها از نظر هدایت الکتریکی نسبتاً بالا هستند. ترکیب یونی آن‌ها شامل مقادیر قابل توجهی سولفات، کلرید، سدیم و کلسیم است. همچنین این باطله‌ها دارای مقدار متوسط عناصر غذایی نظیر نیتروژن، فسفر و پتاسیم و درعین حال دارای غلظت بسیار پایین عناصر سنگین از جمله سرب، کادمیم و جیوه بودند.

<sup>۳</sup> Fourier Transform Infrared Spectroscopy

<sup>۱</sup> Leonardite leachate

<sup>۲</sup> biostimulant

### مواد و روش‌ها

در این پژوهش نمونه‌ها از منطقه پابدانا (زرند)، واقع در ۷۵ کیلومتری شمال غربی کرمان (مختصات تقریبی: ۳۰/۸۷° شمالی، ۵۶/۳۷° شرقی)، از معدن زغال‌سنگ گلتوت و از رگه‌های مختلف معدن تهیه شدند (شکل ۱). این منطقه در ارتفاع ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰ متری از سطح دریا قرار داشته و دارای ذخایر غنی زغال‌سنگ و لئوناردیت است.

از آن‌جا که تاکنون اطلاعات جامع و دقیقی از ترکیب شیمیایی و امکان استخراج اسید هیومیک از لئوناردیت‌های منطقه پابدانا (زرند) و همچنین ضایعات کارخانه زغال‌شویی زرند در دسترس نیست، این مطالعه با هدف بررسی دقیق‌تر این منابع در راستای شناخت پتانسیل‌های بومی در تولید ترکیبات هیومیکی انجام پذیرفت.



شکل ۱- تصویر ماهواره‌ای معدن زغال‌سنگ گلتوت  
Figure 1. Satellite image of the Goltot coal mine

سنج اندازه‌گیری شد. برای ارزیابی ویژگی‌های شیمیایی اسید هیومیک استخراج شده، ۱۰۰ میلی‌گرم از اسید هیومیک خشک شده هر نمونه در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر حل شد و محلول به مدت ۳۰ دقیقه هم‌زده شد. سپس pH و EC اندازه‌گیری شدند. مقادیر حاصل در (جدول ۳) بیان شده است (Sparks et al., 2020).

استخراج اسید هیومیک از نمونه‌های مورد آزمایش به روش کالیفرنیا انجام شد. روش استخراج اسید هیومیک به "روش کالیفرنیا" که به‌عنوان CDEFA Method (روش وزارت کشاورزی و حفاظت از مصرف‌کننده کالیفرنیا) شناخته می‌شود، یک پروتکل استاندارد و ساده برای اندازه‌گیری و استخراج اسید هیومیک از نمونه‌های جامد (مانند خاک، لئوناردیت یا کودهای آلی با حداقل ۰/۵ درصد اسید هیومیک) و مایع (با حداقل ۰/۵ درصد اسید هیومیک) است. این روش بر پایه استخراج قلبایی با هیدروکسید سدیم (NaOH) و رسوب‌دهی اسیدی با اسید هیدروکلریک

در این پژوهش سیزده نمونه لئوناردیت با کدهای L1، L2، L3، L4، L5، L6، L7، L8، L9، L10، L11، L12 و L13 (لیجه) از معدن زغال‌سنگ گلتوت واقع در منطقه پابدانا (زرند) و سه نمونه باطله زغال‌شویی با کدهای C1 (یک‌ماهه)، C2 (چهارماهه) و C3 (چهار ساله) جهت بررسی میزان استخراج اسید هیومیک مورد بررسی قرار گرفت. تمامی ۱۶ نمونه (چه خشک چه مرطوب) ابتدا در شرایط هوای آزاد به‌طور کامل خشک شدند تا رطوبت آن‌ها به حداقل برسد و برای توزین و مراحل بعدی آزمایش آماده شدند. برای سنجش pH و EC نمونه‌ها، از نسبت ۱:۲۰ استفاده شد. به این ترتیب، ۵ گرم از هر نمونه با ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر مخلوط شده و به مدت ۲ ساعت با سرعت ۲۰۰ دور در دقیقه (۲۰۰ rpm) هم‌زده شد. سپس، محلول به مدت ۲۰ ساعت در حالت سکون قرار گرفت و پس از آن مجدداً به مدت ۲ ساعت هم‌زده شد. در نهایت، محلول فیلتر شده و pH با استفاده از دستگاه pH متر و EC با دستگاه هدایت

UV-Vis اندازه‌گیری شد تا نسبت آلیفاتیک به آروماتیک، اندازه مولکولی و وزن مولکولی تعیین گردد (Meng et al., 2021). برای تعیین نسبت‌های اسپکتروسکوپی، مقدار ۳ میلی‌گرم اسید هیومیک از هر نمونه در ۱۰ میلی‌لیتر محلول بافر بی‌کربنات سدیم ( $\text{NaHCO}_3$ ) ۰/۰۵۱ مولار با pH حدود ۷ حل شد. استفاده از بافر بی‌کربنات باعث پایداری pH در محدوده‌ی خنثی و جلوگیری از تغییرات pH در هنگام اندازه‌گیری جذب نوری گردید. برای تحلیل اسپکتروسکوپی، میزان جذب عصاره‌های اسید هیومیک در طول موج‌های ۲۵۰ نانومتر ( $E_2$ ) و ۳۵۰ نانومتر ( $E_3$ ) با استفاده از لامپ دوتریوم و در طول موج‌های ۴۶۵ نانومتر ( $E_4$ )، ۵۵۰ نانومتر ( $E_5$ ) و ۶۶۵ نانومتر ( $E_6$ ) با استفاده از لامپ تنگستن توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر-UV-Vis اندازه‌گیری شد (Stevenson, 1994).

نسبت آلیفاتیک به آروماتیک از طریق تحلیل نسبت جذب در طول موج‌های ۴۶۵ نانومتر ( $E_4$ ) و ۶۶۵ نانومتر ( $E_6$ ) محاسبه شد که نشان‌دهنده ویژگی‌های ساختاری اسید هیومیک بود (Meng et al., 2021).

بر اساس درصد بالای استخراج اسید هیومیک و ویژگی‌های اسپکتروفوتومتری (نسبت  $E_4/E_6$ )، شش نمونه شامل پنج لئوناردیت معدنی ( $L_1, L_5, L_7, L_{10}, L_{13}$ ) و یک باطله زغال شویی ( $C_1$ ) به‌عنوان نمونه‌های منتخب برای بررسی‌های بیشتر انتخاب شدند. لازم به ذکر است که اگرچه تنها چهار نمونه ( $L_1, L_2, L_{10}$  و  $L_{11}$ ) بازدهی بالاتر از ۶۰ درصد داشتند، نمونه‌های  $L_5, L_7$  و  $C_1$  به دلیل ویژگی‌های طیفی متمایز و ساختارهای شیمیایی متفاوت در گروه نمونه‌های منتخب قرار گرفتند تا مقایسه جامع‌تری از ساختار و کیفیت اسیدهای هیومیک استخراجی حاصل شود. ترکیب عنصری این نمونه‌ها، شامل درصد نیتروژن (N)، کربن (C)، هیدروژن (H) و گوگرد (S)، با استفاده از دستگاه آنالیز عنصری (CHNS) اندازه‌گیری شد (Stevenson, 1994). همچنین، طیف‌سنجی (FTIR) برای تأیید ویژگی‌های ساختاری اسید هیومیک استخراجی شده از این نمونه‌ها انجام شد تا کیفیت و مناسب بودن آن‌ها برای کاربردهای احتمالی ارزیابی شود.

از میان روش‌های مختلف شناسایی ساختار مواد هیومیکی، طیف‌نگاری تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR) یکی از ابزارهای کلیدی برای شناسایی گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار مانند کربوکسیل، فنول و هیدروکسیل در لئوناردیت و اسید هیومیک استخراجی شده محسوب می‌شود (Stevenson, 1994). استفاده از این روش در مطالعه‌ی حاضر به درک تغییرات ساختاری در طی فرآیند استخراج کمک می‌کند. برای تحلیل FTIR، طیف‌های اسید هیومیک استخراجی شده با دستگاه

(HCl) بنا شده و برای ارزیابی کیفیت محصولات تجاری هیومیک در کشاورزی استفاده می‌شود. این روش در مقایسه با پروتکل‌های پیچیده‌تر مانند روش IHSS (انجمن بین‌المللی مواد هیومیک)، ساده‌تر و عملی‌تر بود و اغلب برای گواهی‌نامه‌های کشاورزی در ایالات متحده به کار می‌رود. نمونه‌های جامد ابتدا در آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفته تا خشک شود. سپس، ۱ گرم از نمونه جامد (یا ۱۰ میلی‌لیتر از نمونه مایع) با دقت وزن شده و در بطری ۵۰۰ میلی‌لیتری قرار گرفت. به نمونه، ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول NaOH ۰/۵ نرمال افزوده شد (نسبت نمونه به محلول ۱:۱۰۰). در بطری بسته شد و به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق (۲۵ درجه سانتی‌گراد) در تاریکی و عدم حضور اکسیژن تکان داده شد. در ادامه مخلوط حاصل سانتریفیوژ شده (۳۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۲۰ دقیقه) تا مایع رویی (عصاره قلیایی حاوی اسید هیومیک) جدا شود. مایع رویی به بطری جدیدی منتقل شد و رسوب باقی‌مانده با ۵۰ میلی‌لیتر NaOH ۰/۵ نرمال شستشو داده شد. این شستشو دو بار تکرار شد و مایعات شستشو به عصاره قبلی اضافه شدند تا استخراج به‌طور کامل انجام گیرد. به عصاره ترکیبی، اسید هیدروکلریک ۶ نرمال افزوده شده تا pH به کمتر از ۱ برسد. مخلوط به مدت ۱۲ تا ۱۶ ساعت در دمای اتاق نگهداری شد. رسوب تشکیل شده با سانتریفیوژ (۳۰۰۰ دور در دقیقه، ۲۰ دقیقه) جدا شد. رسوب با ۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر شستشو داده شد و این فرآیند ۳ تا ۴ بار تکرار شد تا کلریدها کاملاً حذف شوند. در نهایت رسوب در آون در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شد (CDFA, 1983).

برای بررسی ساختار شیمیایی اسید هیومیک استخراجی شده، میزان جذب عصاره‌های قلیایی حاوی اسید هیومیک و اسیدفولویک (پس از جداسازی هیومین نامحلول از طریق سانتریفیوژ یا ته‌نشینی) اسیدی شدند تا اسید هیومیک رسوب کند. رسوب حاصل شسته، خشک و به‌عنوان نمونه‌ی خالص اسید هیومیک جهت تحلیل‌های طیف‌سنجی استفاده شد. هیومین، به‌عنوان بخش نامحلول در محیط قلیایی، در این مرحله کاملاً از عصاره جدا شد و تنها مواد محلول (اسید هیومیک و اسیدفولویک) برای تحلیل‌های بعدی نگهداری شدند (Chen et al., 1977).

درصد اسید هیومیک استخراجی با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد:

$$100 \times \frac{\text{وزن رسوب خشک شده}}{\text{وزن اولیه نمونه}} = \text{درصد اسید هیومیک}$$

میزان جذب نوری عصاره اسید هیومیک در طول موج‌های خاص (۲۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر) با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتری

بازده استخراج کمتری داشته است. به‌طور مشابه، Sarlaki و همکاران (۲۰۲۰) نیز با بررسی نتایج XRF گزارش کردند که لئوناردیت‌های ایرانی با سیلیکا غالب (۴۸-۴۲ در صد) و کربنات کلسیم کم (۴-۲ در صد) بازده استخراج اسید هیومیک برابر با درصد ۵۶/۸ دارند. باین‌حال، باید توجه داشت که بازده استخراج تنها به ترکیب معدنی وابسته نیست؛ تفاوت در محتوای ماده آلی یا کربن آلی اولیه لئوناردیت‌ها نیز می‌تواند بر مقدار اسید هیومیک قابل استخراج اثرگذار باشد (Tan, 2014). همچنین بازده بالای استخراج اسید هیومیک در نمونه‌ها را احتمالاً به حضور فراوان گروه‌های عاملی کربوکسیل و فنولی نیز بتوان نسبت داد که با یونیزاسیون در محیط قلیایی، حلالیت اسید هیومیک را افزایش داده و استخراج را از ماتریکس معدنی آسان‌تر می‌کنند (Stevenson, 1994). پژوهش‌ها نشان می‌دهد لئوناردیت‌هایی که مقدار بیشتری ساختارهای حلقه‌ای پایدار در ترکیب خود دارند، گروه‌های عاملی شان بهتر در سطح ماده دیده می‌شود. این ویژگی کمک می‌کند تا ترکیبات معدنی مزاحم مثل کربنات کلسیم یا سولفات آهن ساده‌تر از ماده جدا شوند و در نهایت فرایند استخراج اسید هیومیک با کارایی بیشتری انجام گیرد (Piccolo, 2001). Zara و همکاران (۲۰۲۱) برای ارزیابی دقیق‌تر نقش ناخالصی‌های معدنی، نمونه‌های لئوناردیت را با اسید هیدروکلریک یک مولار تیمار کردند و گزارش دادند که پس از حذف بخشی از ترکیبات معدنی، بازده استخراج اسید هیومیک در فرآیند استخراج قلیایی به‌طور قابل توجهی افزایش یافت.

PerkinElmer Spectrum Two در محدوده ۴۰۰-۴۰۰۰  $\text{cm}^{-1}$  با رزولوشن ۴  $\text{cm}^{-1}$  اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها به صورت قرص KBr (۱ میلی‌گرم نمونه در ۱۰۰ میلی‌گرم KBr) تهیه و طیف‌ها با نرم‌افزار Spectrum برای شناسایی پیک‌های کلیدی تحلیل شدند (Giovannella et al., 2004, Artetxe et al., 1993).

## نتایج و بحث

درصد اسید هیومیک استخراج شده از نمونه‌های لئوناردیت و باطله‌های زغال‌شویی در (جدول ۱) نشان داده شده است و برای ارزیابی بازده استخراج اسید هیومیک از این نمونه‌ها استفاده شده است. بر اساس داده‌های (جدول ۱)، نمونه‌های لئوناردیت L1، L2، L10 و L11 به‌ترتیب با بازده استخراج اسید هیومیک ۶۴/۶۱، ۶۰/۰۵، ۶۰/۰۷ و ۶۲/۳۵ درصد، بالاترین عملکرد را در میان نمونه‌های مورد بررسی از منطقه پابدانا (زرند) نشان دادند. علاوه بر بالا بودن محتوای کربن در ماده خام، شاید پایین بودن کربنات‌ها و سولفات‌ها در این نمونه‌ها سبب آزادسازی مؤثرتر مواد هیومیکی و افزایش درصد استخراج شده با شد. Souza و Bragança (۲۰۱۸) با آنالیز XRF نشان دادند که لئوناردیت‌هایی با کربنات کلسیم کمتر از ۵ درصد و سولفات آهن کمتر از ۲ درصد، بازده استخراج اسید هیومیک توسط هیدروکسید پتاسیم را تا ۷۰ درصد افزایش داده است درحالی‌که نمونه‌های حاوی مقادیر بالاتر کربنات کلسیم و سولفات آهن

جدول ۱- pH و EC نمونه‌های لئوناردیت و باطله زغال‌شویی

Table 1. pH and EC of Leonardite and coal-washing waste samples

نمونه Sample	هدایت الکتریکی (μS/cm) EC (μS/cm)	اسیدیته pH
C3	413	8.38
C2	639	7.42
C1	732	7.58
L1	784	6.09
L2	530	3.41
L3	245	6.32
L4	233	5.45
L5	320	2.59
L6	236	5.11
L7	261	7.67
L8	1031	4.24
L9	513	7.11
L10	225	5.81
L11	304	6.57
L12	319	7.3
L13	215	7.67

لئوناردیت L1, L2, L3, L4, L5, L6, L7, L8, L9, L10, L11, L12, L13 و باطله زغال‌شویی C1 (یک ماهه)، C2 (چهار ماهه) و C3 (چهار ساله). Leonardite samples L1, L2, L3, L4, L5, L6, L7, L8, L9, L10, L11, L12, and L13, and coal-washing waste samples C1 (one-month), C2 (four-month), and C3 (four-year).

نمونه L7 از لئوناردیت‌های پابدانا (زرند) با بازده استخراج اسید هیومیک ۱۵/۵۶ درصد، کمترین عملکرد را در مقایسه با سایر نمونه‌ها نشان داد. این بازده پایین به احتمال زیاد ناشی از حضور بالای ناخالصی‌های معدنی، مانند کربنات کلسیم یا سولفات آهن بود که با اسیدهای هیومیکی کمپلکس‌های نامحلول تشکیل داده و فرآیند استخراج در محیط قلیایی را دشوار می‌کنند. نتایج تحقیق Piccolo (۲۰۰۱) نشان داده که کربنات‌ها با گروه‌های عاملی هیومیکی واکنش داده و ترکیبات نامحلول تولید می‌کنند، که حلالیت و استخراج‌پذیری اسید هیومیک را کاهش می‌دهد. Souza و Bragança (۲۰۱۸) با بررسی لئوناردیت‌های برزیلی نشان دادند که محتوای کربنات کلسیم بیش از ۱۰ درصد بازده استخراج اسید هیومیک را به زیر ۵۰ درصد می‌رساند، درحالی‌که مقادیر کمتر از ۵ درصد، بازده را تا ۷۰ درصد افزایش می‌دهد. اکسیداسیون محیطی، ناشی از هوازدگی یا نفوذ آب‌های زیرزمینی غنی از اکسیژن، معمولاً محتوای هیومیکی لئوناردیت را غنی‌تر می‌کند. همچنین، Wang و همکاران (۲۰۲۱) گزارش کردند که اکسیداسیون شیمیایی با آب اکسیژنه در لیگنیت‌های چینی، گروه‌های کربوکسیل را تا ۲۸ درصد افزایش داده و بازده استخراج را از ۳۵ درصد به ۴۵ درصد رسانده است. بازده پایین نمونه L7 احتمالاً به تفاوت در ترکیب معدنی یا درجه اکسیداسیون طبیعی آن نسبت به سایر نمونه‌ها

هدایت الکتریکی لئوناردیت‌ها از ۲۱۵ تا ۱۰۳۱ میکروزیمنس بر سانتی‌متر متغیر بود. نمونه L8 با  $1031 \mu\text{S/cm}$  بالاترین هدایت الکتریکی را داشت که می‌تواند به محتوای بالای کربنات‌ها یا سایر املاح معدنی مانند سولفات‌ها و کلریدها مرتبط باشد. Kalaitzidis و همکاران (۲۰۰۳) گزارش کردند که لئوناردیت‌های با هدایت الکتریکی بالا معمولاً دارای مقادیر بیشتری از مواد معدنی هستند که می‌توانند به‌عنوان منبع عناصر غذایی مختلف در خاک عمل کنند. در مقابل، L13 با  $215 \mu\text{S/cm}$  کمترین EC را داشت.

اسیدیته لئوناردیت‌ها از  $2/59$  (L5) تا  $8/38$  (C3) متغیر بوده و L5 با pH اسیدی ( $2/59$ ) می‌تواند برای تنظیم اسیدیته خاک‌های قلیایی مناسب باشد. بر پایه پژوهش Tan (2014)، استفاده از اسید هیومیک با pH پایین، راهکاری مؤثر برای افزایش فراهمی عناصر کم‌مصرف در خاک‌های قلیایی است. در مقابل، نمونه C3 بیشترین میزان pH را در بین نمونه‌ها ( $8/38$ ) داشت. این ویژگی می‌تواند نشانگر تأثیر ترکیبات معدنی قلیایی در باطله‌های زغال‌شویی باشد، هرچند در این پژوهش آنالیز مستقیم ترکیب معدنی (مانند XRF یا XRD) انجام نشد. Meng و همکاران (۲۰۲۱) نشان داده‌اند که وجود این ترکیبات معدنی در لئوناردیت و باطله‌های معدنی می‌تواند باعث افزایش قلیائیت محیط و pH خاک شود.

کربنات‌ها و سولفات‌ها و همچنین درجه اکسیداسیون شیمیایی، نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان بازده استخراج دارند. این یافته با گزارش‌های پیشین هم‌راستا است. Rani و همکاران (۲۰۲۴) بیان کردند که بازده استخراج اسید هیومیک به شدت تحت تأثیر ماهیت ماده خام و شرایط استخراج قرار دارد و تنها به محتوای اسید هیومیک اولیه محدود نمی‌شود. افزون بر این، Mohinuzzaman و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که حلالیت ترکیبات هیومیکی در محیط قلیایی با حضور یون‌های معدنی و ساختار شیمیایی اولیه لئوناردیت ارتباط مستقیم دارد. به‌طور مشابه، مطالعات Sarlaki و همکاران (۲۰۲۴) نیز نشان داده‌اند که حذف یون‌های مزاحم معدنی در مرحله پالایش، خلوص و بازده اسید هیومیک حاصل از لئوناردیت را به‌طور محسوسی افزایش می‌دهد؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که بازده استخراج بالاتر در برخی نمونه‌های لئوناردیت پابدانا به ترکیب شیمیایی مناسب‌تر، غلظت کمتر ناخالصی‌های معدنی و پایداری ساختاری بیشتر مواد آلی نسبت داده می‌شود. Giovanella و همکاران (۲۰۱۸) توضیح دادند که تنوع قابل توجهی در محتوای اسید هیومیک لئوناردیت از مناطق مختلف را به تفاوت‌های زمین‌شناسی و شرایط محیطی (مانند دما، رطوبت و فعالیت میکروبی) نسبت دادند.

(جدول ۲) نسبت‌های اسپکتروسکوپی حاصل از اندازه‌گیری‌های جذبی اسید هیومیک استخراج شده در طول موج‌های مختلف را برای هر نمونه ارائه می‌دهد. این نسبت‌ها برای تحلیل ویژگی‌های ساختاری و شیمیایی اسید هیومیک به کار گرفته شده‌اند.

مربوط است که می‌توان در مطالعات آینده با روش‌های تحلیلی دقیق‌تر مانند XRF و FTIR بررسی شود.

نمونه‌های باطله زغال‌شویی C1 و C3 با بازده‌های ۱۹/۱۱ و ۲۰/۵۵ در صد نیز عملکرد ضعیفی داشتند. بخشی از این کاهش بازده به احتمال زیاد می‌تواند ناشی از حضور بالای ناخالصی‌های معدنی، مانند سیلیکات‌ها یا سولفات‌ها و بخش از آن مربوط فرآیند شدید زغال‌شویی (تماس طولانی با آب و اکسیژن) باشد که اتواکسیداسیون اسید هیومیک و به دنبال آن کاهش در صد اسید هیومیک در نمونه را به همراه داشته است. Kalaitzidis و همکاران (۲۰۰۳) در مطالعه باطله‌های زغال‌شویی یونانی گزارش کردند که ناخالصی‌های معدنی، به‌ویژه سیلیکات‌ها، با تشکیل پیوندهای شیمیایی با اسید هیومیک، بازده استخراج را به ۲۰ تا ۳۰ درصد کاهش می‌دهند. Souza و Bragança (۲۰۱۸) نیز تأیید کردند که سیلیکات‌ها و سولفات‌ها در باطله‌ها با ممانعت از حلالیت هیومیک، استخراج را دشوار می‌کنند. با این حال، اکسیداسیون شیمیایی می‌تواند بازده را بهبود بخشد. Doskočil و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند که اکسیداسیون با آب‌اکسیژنه در باطله‌های لیگنیت، با افزایش گروه‌های هیدروفیل، بازده را تا ۴۹/۶ درصد افزایش می‌دهد. بنابراین، بازده پایین C1 و C3 به محتوای بالای ناخالصی‌های معدنی و تأثیرات فرآیند زغال‌شویی نسبت داده می‌شود.

نتایج این پژوهش نشان داد که بین لئوناردیت‌های منطقه پابدانا از لحاظ محتوای اسید هیومیک تفاوت وجود دارد که می‌تواند ناشی از تفاوت در ویژگی‌های شیمیایی و معدنی نمونه‌های لئوناردیت باشد. غلظت ناخالصی‌های معدنی نظیر

جدول ۲- درصد استخراج اسید هیومیک و نسبت‌های اسپکتروسکوپی اسید هیومیک استخراج شده از نمونه‌های لئوناردیت و باطله زغال‌شویی

Table 2. Humic acid extraction percentage and spectroscopic ratios of the extracted humic acid selected leonardite and coal-washing waste samples

نمونه‌ها Sample	میزان اسید هیومیک (%) Humic acid content (%)	E4/E6	E3/E5	E2/E3
C3	20.55	1.28	1.17	0.07
C2	47.11	1.70	1.71	0.064
C1	19.11	0.12	0.99	0.069
L1	64.61	3.28	2.74	0.043
L2	60.05	1.14	1.01	0.083
L3	23.43	3.93	3.78	0.004
L4	50.02	2.96	4.52	0.014
L5	45.26	1.01	1.22	0.053
L6	30.02	3.88	3.72	0.004
L7	15.56	1.93	0.91	0.084
L8	38.81	0.85	0.98	0.071
L9	25.45	0.71	0.78	0.058
L10	60.07	2.87	2.61	0.011
L11	62.35	2/6	5.07	0.014
L12	24.03	2	0.82	0.084
L13	46.06	0.58	0.99	0.057

لئوناردیت L1، L2، L3، L4، L5، L6، L7، L8، L9، L10، L11، L12 و L13 و باطله زغال‌شویی C1 (یک ماهه)، C2 (چهار ماهه) و C3 (چهار ساله)

Leonardite samples L1, L2, L3, L4, L5, L6, L7, L8, L9, L10, L11, L12, and L13, and coal-washing waste samples C1 (one-month), C2 (four-month), and C3 (four-year)

نسبت جذبی ۴۶۵ به ۶۶۵ نانومتر ( $E_4/E_6$ ) که شاخصی برای تعیین نسبت ساختارهای آلیفاتیک به آروماتیک در اسید هیومیک است، در نمونه‌های L3 و L6 به ترتیب با مقادیر ۳/۹۳ و ۳/۸۸ بالاترین مقدار را نشان داد این نسبت بالا نشان می‌دهد که زنجیره‌های هیدروکربنی خطی (آلیفاتیک) در ساختار این نمونه‌ها سهم بیشتری دارند. Tan (۲۰۱۴) گزارش کرد که بالاتر بودن عدد نسبت جذبی ۴۶۵ به ۶۶۵ نانومتر نشان‌دهنده بیشتر بودن محتوای آلیفاتیک نسبت به محتوای آروماتیک است. این محققین بالا بودن نسبت جذبی ۴۶۵ به ۶۶۵ در اسید هیومیک را ناشی از فراوانی زنجیره‌های هیدروکربنی خطی و گروه‌های عاملی مانند کربوکسیل و هیدروکسیل دانستند. نسبت بالاتر  $E_4/E_6$  معمولاً با ساختار آلیفاتیک‌تر و حلالیت بالاتر همراه است که می‌تواند استخراج پذیری را افزایش دهد (Stevenson, 1994). Zaccone و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که اسیدهای هیومیک با نسبت جذبی ۴۶۵ به ۶۶۵ نانومتر بالا معمولاً دارای گروه‌های عاملی فعال‌تر و انعطاف‌پذیری ساختاری بیشتری هستند که برهم‌کنش آن‌ها با یون‌ها را تسهیل می‌کند. این ویژگی‌ها بیشتر به کیفیت شیمیایی و ساختاری اسید هیومیک مربوط می‌شوند. در نتیجه، بازده بالاتر لزوماً نشان‌دهنده کیفیت بالاتر اسید هیومیک برای کاربردهای کشاورزی نیست. در مقابل، نمونه‌های C1، L9 و L13 با مقادیر پایین‌تر نسبت جذبی ۴۶۵ به ۶۶۵ نانومتر (۰/۱۲، ۰/۵۸ و ۰/۷۱) ساختار آروماتیک‌تری دارند، به این معنا که حلقه‌های بنزنی و پیوندهای دوگانه در ساختار آن‌ها غالب بود. Tan (۲۰۱۴) توضیح داد که نسبت جذبی ۴۶۵ به ۶۶۵ نانومتر پایین نشان‌دهنده ترکیبات آروماتیکی بیشتر و حضور ساختارهای متراکم‌تر مانند حلقه‌های بنزنی بود که معمولاً با اکسیداسیون پیشرفته‌تر یا حضور مواد اولیه غنی از ترکیبات آروماتیک مرتبط بود. در این نمونه‌ها، احتمالاً فرآیندهای اکسیداسیون شیمیایی یا شرایط استخراج (مانند استفاده از حلال‌های قلیایی قوی) باعث حفظ ساختارهای آروماتیک شده است. Zaccone و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که اسیدهای هیومیک با ویژگی‌های آروماتیکی بالا به دلیل وجود گروه‌های عاملی پایداری نظیر گروه‌های فنولی، مقاومت بیشتری در برابر تجزیه شیمیایی دارند.

نسبت جذبی ۳۵۰ به ۵۵۰ نانومتر ( $E_3/E_5$ ) که نشان‌دهنده اندازه مولکولی اسید هیومیک بود، در محدوده ۰/۷۸ تا ۵/۰۷ متغیر بود. نمونه L11 با مقدار ۵/۰۷ بزرگ‌ترین اندازه مولکولی را نشان داد که احتمالاً به تجمع مولکول‌های بزرگ‌تر با پیوندهای پیچیده‌تر در این نمونه مرتبط بود. Tan (۲۰۱۴) بیان کرد که نسبت جذبی ۳۵۰ به ۵۵۰ نانومتر بالا نشان‌دهنده مولکول‌های بزرگ‌تر با ساختارهای پلیمری پیچیده‌تر بود که اغلب در اسیدهای هیومیک با تجزیه کمتر مشاهده می‌شود. در مقابل، نمونه L9 با مقدار ۰/۷۸ کوچک‌ترین اندازه مولکولی را دارد که می‌تواند به تجزیه بیشتر مولکول‌ها طی فرآیند استخراج یا محتوای اولیه کمتر مولکول‌های بزرگ مرتبط باشد. Zaccone و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که اسیدهای هیومیک با اندازه مولکولی کوچک‌تر به دلیل تحرک بالاتر، برهم‌کنش سریع‌تری با اجزای شیمیایی خاک دارند.

نسبت جذبی ۲۵۰ به ۳۵۰ نانومتر ( $E_2/E_3$ ) که بیانگر وزن مولکولی اسید هیومیک استخراجی بود، بین ۰/۰۴ تا ۰/۰۸ متغیر بود. نمونه‌های L3 و L6 با مقدار ۰/۰۴ کمترین وزن مولکولی را دارند که احتمالاً به دلیل تجزیه بیشتر مولکول‌ها در فرآیند استخراج یا حضور مواد اولیه با وزن مولکولی پایین‌تر بود. Piccolo (۲۰۰۱) گزارش کرد که اسیدهای هیومیک با وزن مولکولی پایین‌تر، به دلیل اندازه کوچک‌تر، تحرک بیشتری در ماتریکس شیمیایی دارند و به راحتی با سایر ترکیبات آلی و معدنی برهم‌کنش می‌کنند. در مقابل، نمونه‌های L2، L7 و L12 با مقدار ۰/۰۸ وزن مولکولی بالاتری دارند که نشان‌دهنده ساختارهای متراکم‌تر و پایداری بود. Tan (۲۰۱۴) توضیح داد که اسیدهای هیومیک با وزن مولکولی بالاتر معمولاً به دلیل پیوندهای پیچیده‌تر، مقاومت بیشتری در برابر تجزیه شیمیایی دارند. نتایج این مطالعه نشان داد که تفاوت در نسبت جذبی ۴۶۵ به ۶۶۵ نانومتر ( $E_4/E_6$ ) بین نمونه‌های لئوناردیت پادانا به ویژگی‌های شیمیایی آن‌ها، شامل غالبیت ساختارهای آلیفاتیک یا آروماتیک، اندازه مولکولی و وزن مولکولی اسید هیومیک استخراج شده وابسته بود.

(جدول ۳) ترکیب عنصری (درصد نیتروژن، کربن، هیدروژن و گوگرد) اسیدهای هیومیک استخراج شده از نمونه‌های لئوناردیت‌های منتخب را نشان می‌دهد.

جدول ۳- ترکیب عنصری، pH و EC اسید هیومیک استخراجی از نمونه‌های منتخب لئوناردیت و باطله زغال‌شویی

Table 3. Elemental composition, pH, and EC of the extracted humic acid from selected leonardite and coal-washing waste samples

نمونه‌های منتخب Selected examples	اسید هیومیک Humic acid	نیتروژن Nitrogen	کربن Carbon	هیدروژن Hydrogen	گوگرد Sulfur	اکسیژن Oxygen	C/N	O/C	H/C	pH	EC(μS.cm-1)	
		%										
C1	19.11	2.1	35.29	2.30	0	60.40	20.49	1.28	0.78	6.46	458	
L1	64.61	2.18	72.22	4.34	0	21.26	38.64	0.22	0.72	6.61	372	
L5	45.26	2.35	56.44	3.70	3.34	34.17	28.01	0.45	0.79	6.59	252	
L7	15.56	2.21	57.06	3.52	0	37.21	30.12	0.49	0.74	6.13	539	
L10	60.07	2.15	52.94	2.89	0	42.02	28.72	0.59	0.66	2.15	458	
L13	46.06	1.97	35.33	2.43	0	60.27	20.92	1.27	0.83	6.45	491	

لئوناردیت L1، L5، L7، L10 و L13 و باطله زغال‌شویی C1 (یک ماهه)

Leonardite samples L1, L5, L7, L10, and L13, and coal-washing waste sample C1 (one-month)

قطبی اکسیژنه بود. چنین ساختارهایی معمولاً با خاصیت اسیدی قوی‌تر و ظرفیت تبادل کاتیونی بالاتر همراه هستند (Rice and MacCarthy, 1991, Senesi and Loffredo, 2001). در مقابل، نمونه‌هایی مانند L1 و L5 با نسبت O/C پایین‌تر (۰/۲۹ و ۰/۶۰) ترکیباتی با ساختار پایدارتر و کمتر اکسیده را نشان می‌دهند. این ویژگی معمولاً در لئوناردیت‌های با درجه اثر فرآیندهای زمین‌شیمیایی طولانی‌تر و اکسیداسیون شدیدتر و محتوای آروماتیک غالب مشاهده می‌شود (Klucakova, 2018, Boguta et al., 2021). نسبت هیدروژن به کربن (H/C) در محدوده‌ی ۰/۰۵۴ تا ۰/۰۶۹ قرار داشت و به‌عنوان شاخصی از نوع پیوندهای کربنی و درجه اشباع مولکول شناخته می‌شود. مقادیر پایین‌تر H/C بیانگر وجود ساختارهای آروماتیک و تراکم و چندحلقه‌ای بودن، در حالی که مقادیر بالاتر نشان‌دهنده سهم بیشتر زنجیره‌های آلیفاتیک در ساختار هستند (Sensi et al., 2001, Conte and Piccolo, 1999). برای نمونه، نسبت H/C پایین در L10 (۰/۰۵۴) حاکی از ویژگی‌های آروماتیکی بیشتر و تراکم بالای ساختار بود، در حالی که در نمونه‌ی L13 (۰/۰۶۹) نسبت بالاتر هیدروژن به کربن، بیانگر سهم نسبی بیشتر پیوندهای اشباع است (Demirbaş, 2003).

به‌طور کلی، مقایسه‌ی نسبت‌های O/C و H/C نشان داد که لئوناردیت‌های دارای O/C پایین و H/C کمتر (مانند L1 و L10) ساختارهایی آروماتیکی‌تر و پایدارتری دارند، در حالی که نمونه‌های دارای O/C بالا (مانند C1 و L13) ترکیباتی با درجه اکسیداسیون بیشتر و حضور گسترده‌تر گروه‌های اکسیژنه را نشان می‌دهند. این نتایج با گزارش‌های پیشین درباره تأثیر منشأ و شرایط زمین‌شناسی بر میزان اکسیداسیون و ترکیب شیمیایی اسیدهای هیومیک سازگار بود (Stevenson, 1994, Tan, 2014, Boguta et al., 2021).

هدایت الکتریکی اسید هیومیک استخراجی در نمونه‌های منتخب بین ۲۵۲ تا ۵۳۹ μS/cm متغیر بود.

بر اساس (جدول ۳)، نسبت کربن به نیتروژن (C/N) در نمونه‌های مختلف از ۱۷/۵۷ در نمونه C1 تا ۳۳/۱۳ در نمونه L1 متغیر بود. نسبت C/N پایین‌تر (مانند ۱۷/۵۷ در C1 و ۱۷/۹۳ در L13) نشان‌دهنده تجزیه‌پذیری بیشتر مواد آلی است چرا که نیتروژن بیشتری نسبت به کربن وجود دارد. این ویژگی می‌تواند به آزادسازی سریع‌تر نیتروژن در خاک کمک کند. Tan (۲۰۱۴) گزارش کرده بود که نسبت پایین C/N (کمتر از ۲۰) در اسیدهای هیومیک، به دلیل افزایش قابلیت جذب نیتروژن، نقش مهمی در فراهمی نیتروژن برای گیاهان در خاک دارد. در مقابل، نسبت C/N بالاتر در L1 (۳۳/۱۳) بیانگر پایداری بیشتر اسید هیومیک است.

تنها نمونه L5 ۳/۳۴ درصد گوگرد داشت. Qin و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که حضور گوگرد در ساختار اسید هیومیک می‌تواند در بهبود کارایی فیزیولوژیکی گیاهان تحت تنش‌های محیطی مانند خشکی و کمبود فسفر نقش داشته باشد. به‌طور مشابه، Della Lucia و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که ترکیبات حاوی گوگرد در اسیدهای هیومیک قادرند فعالیت آنزیم‌های خاک مانند اوره‌آز را افزایش داده و در فرآیندهای زیست‌تصفیه مؤثر باشند.

بر اساس داده‌های (جدول ۳)، درصد اکسیژن در نمونه‌های مورد بررسی بین ۲۱/۲۶ تا ۶۰/۴۰ درصد متغیر بود. بیشترین مقادیر مربوط به نمونه‌های C1 و L13 بود که این میزان بالای اکسیژن، نشان‌دهنده حضور فراوان گروه‌های عاملی اکسیژنه مانند کربوکسیل، کربونیل و فنولی در ساختار اسید هیومیک بود. وجود این گروه‌ها سبب افزایش قطبیت، حلالیت و واکنش‌پذیری ترکیب می‌شود و معمولاً در مواد هیومیکی با درجه‌ی اکسیداسیون بالا مشاهده می‌گردد (Stevenson, 1994, Tan, 2014). نسبت اکسیژن به کربن (O/C) نیز بین ۰/۲۹ تا ۱/۷۱ متغیر بود. مقادیر بالای این نسبت در نمونه‌های C1 و L13 بیانگر درجه اکسیداسیون بیشتر و غلبه‌ی گروه‌های

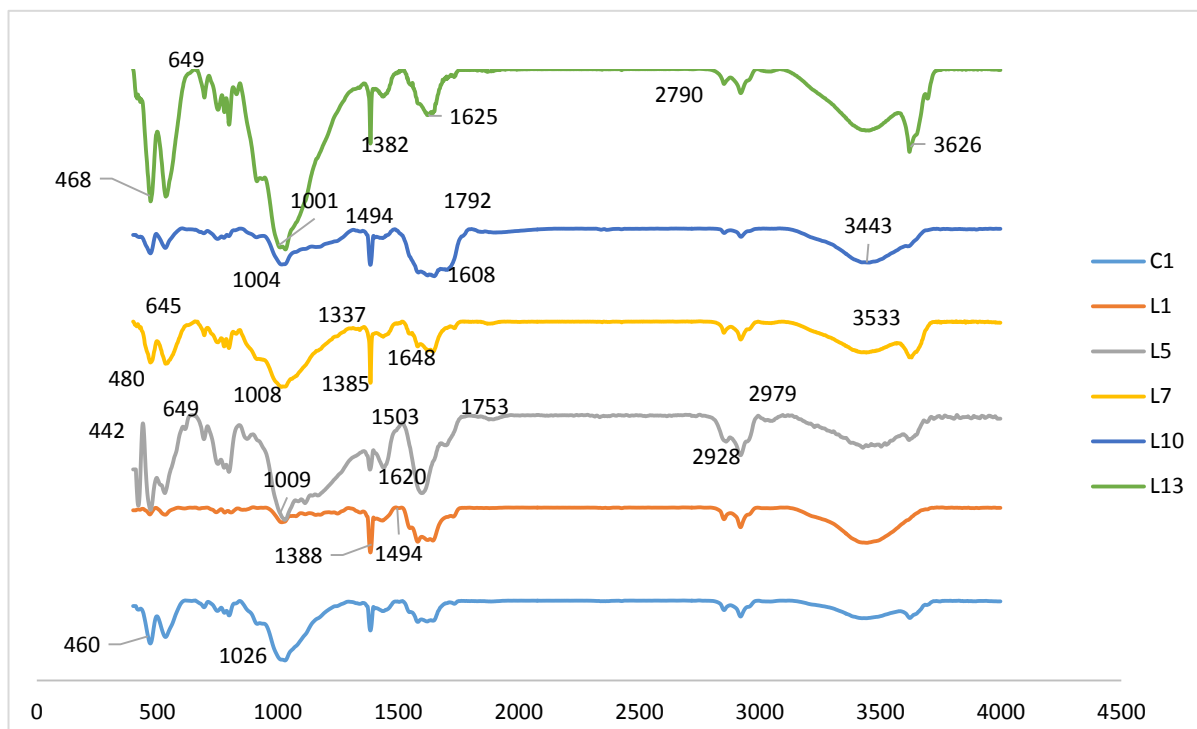
L5 و L1 با شدت بیشتری ظاهر شد که نشان‌دهنده حضور گروه‌های کربوکسیلیک (C=O / COOH) بود. مطالعات Wang و همکاران (۲۰۲۱) تأیید کرده‌اند که افزایش این باند نشانه غنی‌تر بودن اسیدهای هیومیک از گروه‌های اسیدی و واکنش‌پذیر است. پژوهش Sarlaki و همکاران (۲۰۱۹) که بر روی طیفی لئوناردیت و اسیدهای هیومیک حاصل از آن بود نشان داد که شدت این ناحیه با افزایش محتوای اکسیژنی ترکیب ارتباط مستقیم دارد. پیک‌های مشاهده شده در محدوده ۱۳۰۰ تا  $1500\text{ cm}^{-1}$  نیز را می‌توان به ارتعاشات کششی و خمشی گروه C-O فنولی در اسید هیومیک استخراجی، C=C در ساختار آروماتیک و همچنین ترکیبات پیتیدی در اسید هیومیک نسبت داد (جیوانلا و همکاران، ۲۰۰۴؛ کلوچاکووا ۲۰۱۸). در ناحیه  $1500-1650\text{ cm}^{-1}$ ، پیک‌های مرتبط با ساختارهای آروماتیک (C=C) در همه نمونه‌ها مشاهده شد، اما شدت آن‌ها در L7 و L10 بیشتر بود. حضور قوی این باند نشان می‌دهد که ساختارهای آروماتیک نقش غالبی در ترکیب نهایی این دو نمونه دارند؛ وضعیتی که در مطالعات Xin و همکاران (۲۰۲۱) که بر روی اسیدهای هیومیک منشأ لئوناردیت مطالعه کرده بودند گزارش شد. تفاوت پیک‌های FTIR اسیدهای استخراج شده از نمونه‌های مختلف نشان‌دهنده تغییرات در ساختار شیمیایی بود. Schnitzer (۱۹۷۸) در مطالعه‌ای کلاسیک روی FTIR اسید هیومیک توضیح داد که تفاوت‌های بین نمونه‌ها از نظر پیک‌های FTIR به درجه اکسیداسیون و حضور ناخالصی‌ها بستگی دارد که توجیه‌کننده تنوع در نمونه‌های این مطالعه است. نتایج طیف‌سنجی مادون قرمز نشان داد که در اسید هیومیک استخراجی حلقه‌های آروماتیک، زنجیره آلیفاتیک و تعدادی از گروه‌های عامل مهم شامل هیدروکسیل فنولی، کربوکسیل، کربونیل وجود دارند. پیک‌های ناحیه  $1000-1250\text{ cm}^{-1}$  که مربوط به ارتعاشات C-O الکل‌ها، اترها و فنول‌ها هستند، در همه نمونه‌ها دیده شدند، اما در CI و L1 شدت بیشتری داشتند. این موضوع نشان‌دهنده حضور بیشتر گروه‌های اکسیژنه فعال در این نمونه‌هاست که می‌تواند در برهم‌کنش با یون‌های فلزی و ترکیبات آلی نقش داشته باشند. یافته‌های اخیر نیز نشان داده‌اند که شدت بالاتر این ناحیه با توانایی بالاتر اسید هیومیک در تعاملات سطحی و جذب یون‌ها مرتبط است (Baran et al., 2021). در محدوده  $460-650\text{ cm}^{-1}$  پیک‌هایی با شدت کم در تمامی نمونه‌ها مشاهده شد که مربوط به ارتعاشات حلقه‌ای و در برخی موارد تأثیر مواد معدنی همراه است. مشابه این الگو در مطالعات طیفی Sarlaki و همکاران (۲۰۱۹) که بر روی لئوناردیت و فازهای هیومیکی منشأ ایرانی تحقیق کرده بودند گزارش شد

پایین‌ترین مقدار مربوط به نمونه L5 ( $252\text{ }\mu\text{S/cm}$ ) و بالاترین مقدار مربوط به نمونه L7 ( $539\text{ }\mu\text{S/cm}$ ) بود. این اختلاف می‌تواند ناشی از میزان متفاوت یون‌های باقیمانده در ساختار اسید هیومیک باشد؛ یون‌هایی که پس از شست‌و شو به صورت جذب‌شده یا پیوند یافته در ساختار باقی می‌مانند. Piccolo (۲۰۱۶) اشاره کرد که حتی با شست‌وشوی کامل، مقدار اندکی از یون‌های محلول ممکن است در ساختار اسید هیومیک حفظ شود و بر EC نهایی اثر بگذارد. مقادیر pH اسید هیومیک نیز در نمونه‌های منتخب بازه‌ای از  $6/13$  تا  $6/61$  را نشان داد. نزدیک‌ترین مقدار به خنثی در نمونه L1 ( $6/61$ ) مشاهده شد، در حالی که L7 ( $6/13$ ) پایین‌ترین مقدار را داشت. pH نزدیک به خنثی معمولاً با پایداری بیشتر گروه‌های عاملی و رفتار مناسب‌تر در خاک‌های زراعی همراه است. Palumbo و همکاران (۲۰۱۸) گزارش کردند که اسیدهای هیومیک با pH نزدیک به خنثی می‌توانند به عنوان محرک زیستی عمل کرده و رشد میکروارگانیسم‌های مفید خاک را تقویت کنند. در مقابل، نمونه‌هایی با pH کمی اسیدی (مانند L7) ممکن است فعالیت میکروبی و حلالیت برخی عناصر غذایی را افزایش دهند؛ موضوعی که در مطالعه‌ی Olivares و Canellas (۲۰۱۴) نیز به آن اشاره شده است. به‌طور کلی، تنوع محدود اما معنی‌دار در مقادیر EC و pH میان نمونه‌های منتخب نشان می‌دهد که منشأ معدنی لئوناردیت و تفاوت در ترکیب یونی نمونه‌ها می‌تواند بر کیفیت اسید هیومیک استخراجی اثرگذار باشد؛ هرچند همه نمونه‌های منتخب از نظر شیمیایی در محدوده‌ای قرار گرفتند که برای کاربردهای کشاورزی مناسب تلقی می‌شود.

نتایج طیف FTIR در اسیدهای استخراجی از نمونه‌های منتخب در (شکل ۲) نشان داده شده است. حضور پیک پهن در محدوده  $3400\text{ cm}^{-1}$  تا  $3500\text{ cm}^{-1}$  با این تفاوت که در نمونه L13 این باند به صورت یک قله‌ی تیزتر و مشخص‌تر در حوالی  $3620-3720\text{ cm}^{-1}$  ظاهر شد، می‌تواند بیانگر ارتعاشات گروه‌های هیدروکسیل فنولی و هیدروکسیل اسیدی باشد که با توجه به پیک‌های مشاهده شده در محدوده  $1600\text{ cm}^{-1}$  تا  $1700\text{ cm}^{-1}$  مبنی بر ارتعاشات C=O، حضور گروه کربوکسیلیک در اسید هیومیک تأیید می‌شود. چنین الگوی طیفی در پژوهش‌های Sarlaki و همکاران (۲۰۱۹) و García و همکاران (۲۰۱۶) نیز مشاهده شد. پیک‌های مشاهده شده در محدوده  $2900\text{ cm}^{-1}$  را می‌توان به ارتعاشات CH در زنجیره آلیفاتیک اسید هیومیک نسبت داد. Artetxe و همکاران (۱۹۹۳) در تحلیل FTIR اسید هیومیک استخراجی از لئوناردیت گزارش کردند که افزایش پیک C=O ( $1700\text{ cm}^{-1}$ ) نتیجه اکسیداسیون گروه‌های فنولی است. پیک مشخص ناحیه  $1750-1700\text{ cm}^{-1}$  در نمونه‌های

بیشتر بخش آروماتیک در L7 و L10 نشان‌دهنده تأثیر منشأ و ترکیب اولیه لئوناردیت بر ساختار نهایی اسید هیومیک است. هم‌خوانی این الگو با پژوهش‌ها نشان می‌دهد که لئوناردیت‌های منطقه پابدانا از پتانسیل ساختاری مناسبی برای تولید اسید هیومیک باکیفیت بالا برخوردارند.

در مجموع، نتایج FTIR نشان می‌دهد که اسید هیومیک استخراج شده از نمونه‌های منتخب شامل مجموعه‌ای از گروه‌های کربوکسیلیک، ساختارهای آروماتیک، پیوندهای C-O و گروه‌های هیدروکسیل است. تفاوت‌های مشاهده شده میان نمونه‌ها از جمله محتوای اسیدی بیشتر در L1 و L5 و سهم



شکل ۲- طیف FTIR اسید هیومیک استخراج شده از نمونه‌های لئوناردیت و باطله زغال‌شویی. L1، L5، L7، L10 و L13 نمونه‌های لئوناردیت منتخب و C1 و باطله یک‌ماهه زغال‌شویی

Figure 2. FTIR spectra of the humic acid extracted from leonardite and coal-washing waste samples. L1, L5, L7, L10, and L13 as selected leonardite samples, and C1 as the one-month coal-washing waste sample

گروه‌های عاملی فعال (کربوکسیل و فنولی) نیز نقش کلیدی در کارایی و کیفیت اسید هیومیک استخراجی دارد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی تأثیر تیمارهای شیمیایی و بیولوژیکی بر لئوناردیت و ضایعات زغال‌شویی باهدف دستیابی به افزایش بازدهی استخراج و افزایش کیفیت اسید هیومیک مورد توجه قرار گیرد. همچنین مطالعات XRF جهت تعیین نقش ناخالصی‌های معدنی در میزان استخراج اسید هیومیک از لئوناردیت و باطله زغال‌شویی در پژوهش‌های آتی مورد توجه قرار گیرد.

### تقدیر و تشکر

این رساله با حمایت مالی سازمان صنایع کوچک و شهرک‌های صنعتی ایران انجام شده است.

### نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که لئوناردیت‌های معدن زغال‌سنگ گل‌توت در منطقه پابدانا (زرند، کرمان)، از نظر ترکیب شیمیایی و ساختار مولکولی، تنوع قابل توجهی دارند و می‌توانند منبعی مناسب برای استخراج اسید هیومیک با بازده بالا باشند. تیمارهای L1، L2، L10 و L11 با بازده استخراج بیشتر از ۶۰ درصد، به‌عنوان منابع کارآمد برای تولید اسید هیومیک شناخته شدند. بررسی‌های طیف‌سنجی نشان داد که تفاوت در نسبت‌های جذبی (به‌ویژه  $E_3/E_5$  و  $E_4/E_6$ ) بیانگر اختلاف در ساختارهای آلیفاتیک و آروماتیک، اندازه و وزن مولکولی اسید هیومیک بود. بر همین اساس می‌توان گفت بازده بالاتر لزوماً به معنای کیفیت بالاتر اسید هیومیک نیست چرا که ساختارهای شیمیایی و

## References


- Arquetopanyo, O., Thongmee, T. & Sooksamiti, P., 2018. Chemical characterization of leonardite and its potential use as soil conditioner and plant growth enhancement. *Asia-Pacific Journal of Science and Technology*, 22(04), Article APST-22-04-01. <https://so01.tci-thaijo.org/index.php/APST/article/view/107637>
- Artetxe, A., Aizpurua, A. & Artetxe, J., 1993. Structural investigations of humic acid from leonardite by spectroscopic methods. *Geoderma*, 56(1-4), pp.539-550. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(93\)90009-A](https://doi.org/10.1016/0016-7061(93)90009-A)
- Baran, A. et al. (2021). FTIR insight into functional groups of humic acids from mineral and organic origin. *Applied Geochemistry*, 132, 105–112. DOI:10.1081/SL-100002007
- Boguta, P., D' Orazio, V., Sokołowska, Z. and Senesi, N. (2021) 'Chemical and spectroscopic characterization of humic acids derived from lignite and composts', *Journal of Soils and Sediments*, 21, pp. 1753-1768. DOI:10.1080/00103624.2023.2277415
- Brady, N.C. & Weil, R.R., 2016. *The nature and properties of soils*. 15th ed. Pearson Education.
- California Department of Food and Agriculture (CDFA), 1983. Humic Acid Method. Sacramento: CDFA. Available at: <https://www.cdffa.ca.gov/is/cac/pdfs/HumicAcid-HumicAcidMethod.pdf>
- Canellas, L.P. & Olivares, F.L., 2014. Physiological responses to humic substances as plant growth promoter. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 1(1), Article 3. <https://doi.org/10.1186/2196-5641-1-3>
- Chen, Y., Senesi, N. and Schnitzer, M., 1977. Information provided on humic substances by E4/E6 ratios. *Soil Science Society of America Journal*, 41, pp.352–358. <https://doi.org/10.2136/sssaj1977.03615995004100020037x>
- Conte, P. and Piccolo, A. (1999) 'Conformational arrangement of dissolved humic substances as revealed by NMR spectroscopy', *Environmental Science & Technology*, 33(10), pp. 1682-1690. <https://doi.org/10.1021/es9808604>
- Della Lucia, M.C., Tiraferri, A. & Sethi, R., 2023. Effect of humic deposit (leonardite) on degradation of semi-volatile and heavy hydrocarbons and soil quality in crude-oil-contaminated soil. *Environmental Technology & Innovation*, 30, Article 103075. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103075>
- Demirbaş, A., 2003. Characterization of humic substances from lignite samples. *Energy Sources*, 25(1), pp.23–32. <https://doi.org/10.1080/00908310290142082>
- Doskočil, L., Grasset, L., Valková, D. and Pekar, M., 2014. Hydrogen peroxide oxidation of humic acids and lignite. *Fuel*, 134, pp.165-176. doi:10.1016/j.fuel.2014.05.058. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.05.058>
- Fuentes, M., Baigorri, R. & Garcia-Mina, J.M., 2018. Characterization of humic acids extracted from different sources using FTIR and <sup>13</sup>C NMR spectroscopy. *Soil Science Society of America Journal*, 82(3), pp.645-652. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.11.0397>
- García, A.C., de Souza, L.G.A., Pereira, M.G., Castro, R.N., García-Mina, J.M., Zonta, E. et al., 2016. Structure-property-function relationship in humic substances to explain the biological activity in plants. *Scientific Reports*, 6(1), p.20798. <https://doi.org/10.1038/srep20798>
- Giovanela, M. et al., 2004. Elemental and spectroscopic characterization of humic acids fractionated by gel permeation chromatography. *Soil Science*, 169(10), pp.727-735. <https://doi.org/10.1097/01.ss.0000144147.13399.45>
- Giovanela, P., Carmo, J.B., Collins, C.D. and Gobetti, M., 2018. Earthworms as a bioindicator of soil quality. *Frontiers in Environmental Science\**, 6, p.69. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00069>
- Heydarzadeh, M., Naqavi, H. and Moghaddam, M.R., 2013. Evaluation of chemical, physical and fertility properties of coal washing wastes for agricultural use. *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*, 14, p.58. Available at: <https://civilica.com/doc/1406248/> (In Persian)
- Kalaitzidis, S., Papazisimou, S. & Christanis, K., 2003. Preliminary comparative analyses of two Greek leonardites. *Fuel*, 82(7), pp.859-861. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(02\)00373-9](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(02)00373-9)
- Klucakova, M., 2018. FTIR spectroscopy of humic acids extracted from leonardite. *Journal of Molecular Structure*, 1173, pp.140-145. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2018.06.064>
- Kulikowska, D., Gusiati, Z.M. & Klik, B., 2019. Chemical composition and agricultural potential of leonardite from Polish deposits. *Journal of Soils and Sediments*, 19(6), pp.2456-2468. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02269-4>
- Meng, F., Huang, Q., Larson, S.L. and Han, F.X., 2021. The adsorption characteristics of uranium (VI) from aqueous solution on leonardite and leonardite-derived humic acid: a comparative study. *Langmuir*, 37(43), pp.12557-12567. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.1c01838>
- Mohinuzzaman, M., Rahman, M. M., & Islam, M. S. (2020). Insights into solubility of soil humic substances: influence of pH, ionic strength and mineral impurities. *Science of the Total Environment*, 735, 139905. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137395>
- Palumbo, G., Schiavon, M. & Nardi, S., 2018. Biostimulant potential of humic acids extracted from an amendment obtained via combination of olive mill wastewaters (OMW) and a pre-treated organic material derived from municipal solid waste (MSW). *Frontiers in Plant Science*, 9, Article 1028. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01028>
- Piccolo, A., 2001. The supramolecular structure of humic substances. *Soil Science*, 166(11),

- pp.810-832. <https://doi.org/10.1097/00010694-200111000-00007>
25. Piccolo, A., 2016. The nature of soil organic matter and innovative soil managements to fight soil degradation. In: D.L. Sparks, ed. *Advances in agronomy*. Vol. 139. Academic Press, pp.1-37. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2016.05.001>
  26. Qin, X., Wang, Y., Cui, X., Zhang, X., Li, Y. and Wang, Y., 2020. Molecular signatures of humic acids from different sources as revealed by ultrahigh resolution mass spectrometry. *Journal of Chemistry\**, 2020, p7171582. <https://doi.org/7171582/2020/10.1155> .
  27. Rani, J., Sharma, N., & Kaur, G. (2024). Extraction and chemical characterization of humic acid from different organic sources. *Scientific Reports*, 14(1), 116805. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-11680580>
  28. Rice, J.A. and MacCarthy, P. (1991) 'Statistical evaluation of the elemental composition of humic substances', *Organic Geochemistry*, 17(5), pp. 635-648. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(91\)90006-6](https://doi.org/10.1016/0146-6380(91)90006-6)
  29. Sarlaki, E., Kianmehr, M.H., Marzban, N., Shafizadeh, A., Sheikh Ahmad Tajuddin, Sh, A, F., Hu, S., Tabatabaei, M and Aghbashlo, M Hu, S., Tabatabaei, M. and Aghbashlo, M., 2024. Advances and challenges in humic acid production technologies from natural carbonaceous material wastes. *Chemical Engineering Journal*, 498, p.155521. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.155521>.
  30. Sarlaki, E., Sharif Paghaleh, A., Kianmehr, M.H. and Asefpour Vakilian, K., 2020. Valorization of lignite wastes into humic acids: process optimization, energy efficiency and structural features analysis. *Renewable Energy*, 163, pp.105-122. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.096> .
  31. Sarlaki, E., Sokhandan-TooMaj, M., Paghaleh, A., Kianmehr, M.H. and Nikousafat, O., 2019. Extraction of humic acid from lignite coals using stirred tank reactors (STRs): evaluation of process parameters and final product properties. *Iranian Journal of Water and Soil Research*, 50(5), pp.1112-1125. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2018.260201.667947> (In Persian)
  32. Schnitzer, M., 1978. Humic substances: Chemistry and reactions. In: M. Schnitzer & S.U. Khan, eds. *Soil organic matter*. Elsevier, pp.1-64. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)70002-4](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)70002-4)
  33. Senesi, N. and Loffredo, E. (2001) *The chemistry of soil organic matter*. In: Sparks, D.L. (ed.) *Soil Physical Chemistry*. 2nd edn. Boca Raton: CRC Press, pp. 239-370. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9780203739280-6/chemistry-soil-organic-matter-nicola-senesi-elisabetta-loffredo>
  34. Singh, B.P., 2005. COAL WASHING & POWER GENERATION FROM WASHERY REJECTS. 2nd Indo-US Coal Working Group Meeting, Washington, November 2005. [Online] Available at: [https://fossil.energy.gov/international/Publications/cwg\\_nov05\\_singh\\_washery.pdf](https://fossil.energy.gov/international/Publications/cwg_nov05_singh_washery.pdf)
  35. Souza, F. & Bragança, S.R., 2018. Extraction and characterization of humic acid from coal for the application as dispersant of ceramic powders. *Journal of Materials Research and Technology*, 7(3), pp.254-260. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2017.08.008>
  36. Sparks, D.L., Page, A.L. & Helmke, P.A., 2020. *Methods of soil analysis: Part 3-Chemical methods*. Soil Science Society of America. <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.2136/sssabookser5.3>
  37. Stevenson, F.J., 1994. *Humus chemistry: Genesis, composition, reactions*. John Wiley & Sons. <https://www.wiley.com/en-us/Humus+Chemistry%3A+Genesis%2C+Composition%2C+Reactions%2C+2nd+Edition-p-9780471594741>
  38. Tan, K.H., 2014. *Humic matter in soil and the environment: Principles and controversies*. CRC Press. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20153427341>
  39. Trckova, M., Lorencova, M., Babinsky, P., Toman, J., Sustova, K., Bartejsova, M. and Vacha, R., 2018. The effect of leonardite and lignite on the health of weaned piglets. *Research in Veterinary Science*, 119, pp.9-16. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2018.06.004> .
  40. Wang, Y., Li, J., Wang, Y., Zhang, X. and Liu, Y., 2021. Characterization of humic acids from original coal and its oxidization production. *Scientific Reports*, 11(1), p.15052. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94949-0> .
  41. Xin, P., Liu, Q., Zhang, K. et al., 2025. Functional groups as functional drivers: structure-activity relationships in humic substances for medical applications. *Environmental Geochemistry and Health*, 47, p.564. <https://doi.org/10.1007/s10653-025-02885-z>.
  42. Zaccone, C., Miano, T.M. & Shoty, W., 2017. Molecular characterization of humic substances in Arctic soils using liquid chromatography coupled to mass spectrometry. *Geoderma*, 298, pp.1-9. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.03.005>
  43. Zara, M., Ahmad, Z., Akhtar, J., Shahzad, K., Sheikh, N. and Munir, S., 2021. Extraction and chemical characterization of humic acid from nitric acid treated lignite and bituminous coal samples. *Sustainability*, 13(16), p.8969. <https://doi.org/10.3390/su13168969> .





## Assessing the Effects of Converting Barren Land to Olive Orchards on Soil Physical, Chemical, and Biological Properties: A Case Study in Guilan Province

Samira Hemmati<sup>a</sup> , Kamran Moravej<sup>a</sup>, Mir Naser Navidi<sup>b</sup>, Ahmad Golchin<sup>a</sup>, and Javad Seyedmohammadi<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

<sup>b</sup> Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran.

### Article Info

#### Article Type

Research Article

#### Received

November 01, 2025

#### Revised

December 05, 2025

#### Accepted

December 13, 2025

#### Published online

December 20, 2025

#### Keywords

Land Use Change,  
Olive Orchard,  
Soil Quality,  
Soil Organic Carbon Stock,  
Soil Properties

#### \*Corresponding author's email

[s.hemmati@znu.ac.ir](mailto:s.hemmati@znu.ac.ir)

### Extended Abstract

**Background and Objectives:** Land use change has been widely recognized as a major anthropogenic driver altering soil quality and ecosystem functions, particularly in semi-arid environments. The conversion of natural or unused lands to agricultural systems often induces significant transformations in the physical, chemical, and biological attributes of soils. In Iran, especially in the northern semi-arid zones, such changes have accelerated due to agricultural expansion, yet region-specific studies remain limited. The present study was designed to evaluate the impact of converting bare lands into olive orchards on key soil properties in Lushan, a representative semi-arid region in Guilan Province. Understanding how these changes affect soil functionality is essential for sustainable land management and ecological restoration.

**Methodology:** The study area is located in the Lushan district of Guilan Province, encompassing approximately 300 hectares and characterized by semi-arid climatic conditions with an average annual precipitation of 273 mm. Two distinct land uses (bare land and olive orchard) were selected for soil sampling. Composite soil samples were collected from each land use type at a depth of 0–30 cm, with 12 replicates per treatment. Physical properties such as texture, bulk density, and dispersible clay were measured using standard methods. Chemical properties including soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), available phosphorus ( $P_{ava.}$ ), available potassium ( $K_{ava.}$ ), calcium (Ca), magnesium (Mg), pH, electrical conductivity (EC), and cation exchange capacity (CEC), were analyzed. Biological indicators such as basal respiration and microbial quotient were also assessed. Data were statistically analyzed using ANOVA and Duncan's multiple range test at  $p < 0.01$  significance level.

**Results and Discussion:** The findings revealed that land use conversion significantly influenced most soil parameters. SOC increased by 2.82-fold in olive orchards compared to bare land. Total nitrogen rose by 2.86 times, respectively, while  $P_{ava.}$  improved by 18.42% in olive orchards. Available  $K_{ava.}$ , particularly in olive orchards, reached 105.26 mg/kg, 6.7 times higher than in bare soils. CEC increased by 7.48% in olive orchards, reflecting improved nutrient retention. EC levels rose by approximately 15% in agricultural soils, while pH declined from 8.42 in bare soils to 8.30 in olive orchard soils, indicating enhanced acid-neutral buffering and potential improvement in micronutrient availability. In terms of physical characteristics, bulk density was reduced by 5.19% in olive orchards, enhancing soil aeration and root growth potential. Dispersible clay content decreased by 25.18%, indicating greater soil structural stability and reduced erosion risk. Biologically, basal respiration increased significantly, with values of 0.540 mg CO<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> in olive orchards, compared to 0.283 mg CO<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> in bare soils. This reflects heightened microbial activity and improved organic matter turnover.

in cultivated soils. These results confirm that the adoption of agricultural land uses under managed conditions can lead to substantial improvements in soil health by enhancing organic matter content, nutrient cycling, microbial function, and structural stability.

**Conclusion:** The conversion of bare lands to olive orchards under the semi-arid conditions of Guilan Province significantly enhanced soil physical, chemical, and biological properties. Improvements in SOC, nitrogen, phosphorus, potassium, and microbial activity suggest that such land use transformations, if well-managed, can contribute to restoring soil functionality and increasing sustainable productivity. However, monitoring potential issues, such as salinity buildup and nutrient leaching, remains essential. These findings underscore the importance of land use planning and adaptive soil management in semi-arid agroecosystems.

---

**Cite this article:** Hemmati, S., Moravej, K., Navidi, M.N., Golchin, A., and Seyedmohammadi, J., 2025. Assessing the Effects of Converting Barren Land to Olive Orchards on Soil Physical, Chemical, and Biological Properties: A Case Study in Guilan Province. *Journal of Soil Research*, 39 (3), pp 361-381.



**DOI:** [10.22092/IJSR.2025.371182.798](https://doi.org/10.22092/IJSR.2025.371182.798)

**Publisher:** Soil Science Society of Iran

---



## ارزیابی اثر تغییر کاربری اراضی بایر به باغ زیتون بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک: مطالعه موردی در استان گیلان

سمیرا همتی<sup>۱\*</sup> ID، کامران مروج<sup>۱</sup>، میرناصر نویدی<sup>۲</sup>، احمد گلچین<sup>۱</sup> و جواد سیدمحمدی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

<sup>۲</sup> مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
<b>نوع مقاله:</b> مقاله پژوهشی	تغییر کاربری اراضی، به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک که منابع خاک با تهدیدهای جدی مواجه هستند، یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر کیفیت خاک و پایداری اکوسیستم‌های خاکی محسوب می‌شود. هدف این مطالعه، بررسی اثر تغییر کاربری اراضی بایر به باغ زیتون بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در منطقه لوشان، استان گیلان است. برای این منظور، سه منطقه همجوار با چشم‌انداز مشابه و شامل دو نوع کاربری بایر و باغ زیتون انتخاب و نمونه‌برداری از ۷۲ نقطه در عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر انجام شد. سپس برخی از ویژگی‌های مهم شیمیایی، فیزیکی و زیستی آن‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که محتوای کربن آلی و نیتروژن کل خاک در باغ زیتون به ترتیب ۲/۸۲ و ۲/۸۶ برابر بیشتر از زمین بایر بود. همچنین، مقدار فسفر و پتاسیم قابل جذب در باغ زیتون به ترتیب ۱۸/۴۲ درصد و ۶/۷ برابر بیشتر بود. ظرفیت تبادل کاتیونی در باغ زیتون ۷/۴۸ درصد افزایش یافت، در حالی که جرم مخصوص ظاهری خاک ۵/۱۹ درصد کاهش یافت. درصد رس قابل انتشار نیز در باغ زیتون به‌طور معناداری کاهش یافته و ۱۸/۲۵ درصد کمتر از زمین بایر بود. نرخ تنفس میکروبی در باغ زیتون ۱/۹ برابر بیشتر از زمین بایر ثبت شد. این یافته‌ها نشان داد که تغییر کاربری زمین‌های بایر به باغ زیتون منجر به بهبود قابل توجه ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در مناطق نیمه‌خشک شد و با انجام مطالعات تکمیلی شاید بتواند به‌عنوان راهکاری مؤثر برای ارتقای بهره‌وری اراضی در مناطق مشابه مورد استفاده قرار گیرد.
<b>تاریخ دریافت:</b> ۱۴۰۴/۰۸/۱۰	
<b>تاریخ بازنگری:</b> ۱۴۰۴/۰۹/۱۳	
<b>تاریخ پذیرش:</b> ۱۴۰۴/۰۹/۲۲	
<b>تاریخ انتشار:</b> ۱۴۰۴/۰۹/۲۹	
<b>واژه‌های کلیدی</b>	
باغ زیتون، تغییر کاربری اراضی، کیفیت خاک، کربن آلی، ویژگی‌های خاک	
* ایمیل نویسنده مسئول <a href="mailto:s.hemmati@znu.ac.ir">s.hemmati@znu.ac.ir</a>	

استناد: همتی، س.، مروج، ک.، نویدی، م.ن.، گلچین، ا.، سیدمحمدی، ج.، ۱۴۰۴. ارزیابی اثر تغییر کاربری اراضی بایر به باغ زیتون بر ویژگی‌های

فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک: مطالعه موردی در استان گیلان. مقاله پژوهشی، نشریه پژوهش‌های خاک، (۳) ۳۹، ص ۳۶۱-۳۸۱.

DOI: 10.22092/IJSR.2025.371182.798



## مقدمه

تغییر کاربری اراضی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل انسانی مؤثر بر چرخه‌های بیوژئوشیمیایی، کیفیت خاک و پایداری اکوسیستم‌های طبیعی شناخته می‌شود. توسعه سریع فعالیت‌های کشاورزی، گسترش شهرنشینی و تبدیل اراضی بایر به کاربری‌های زراعی از جمله فرآیندهایی هستند که در دهه‌های اخیر به‌طور گسترده در مناطق مختلف جهان رخ داده‌اند (Hemmati et al., 2023). این تغییرات، با تأثیر مستقیم و غیرمستقیم بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، پیامدهای متعددی همچون کاهش سطح حاصلخیزی، افزایش فرسایش و تغییر در چرخه عناصر غذایی را به همراه دارند (Zhu et al., 2023; Chen et al., 2024). به همین دلیل، به‌منظور مدیریت پایدار منابع خاک و حفظ عملکرد اکوسیستم‌ها، بررسی اثرات تغییر کاربری اراضی بر ویژگی‌های خاک از اهمیت فزاینده‌ای برخوردار است. در این میان، تبدیل اراضی بایر به کاربری‌های کشاورزی به دلیل تأثیر بر ساختار خاک، میزان کربن آلی، ویژگی‌های شیمیایی و فعالیت‌های میکروبی، مورد توجه محققان قرار گرفته است (Chen et al., 2023; Yuan et al., 2024). مطالعات نشان داده‌اند که تغییر کاربری زمین می‌تواند موجب افزایش یا کاهش مقادیر ماده آلی خاک، تغییر در میزان نیتروژن و فسفر قابل جذب و دگرگونی در خصوصیات فیزیکی همچون جرم مخصوص ظاهری، تخلخل و نفوذپذیری شود (Geremew et al., 2023; Zhang et al., 2019). همچنین فعالیت‌های زیستی خاک از جمله تنوع و جمعیت میکروارگانیسم‌ها و فعالیت آنزیمی به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر نوع کاربری زمین قرار می‌گیرند (Yuan et al., 2024; Yuefeng et al., 2014). اثر تغییر کاربری اراضی بر کیفیت خاک، وابسته به شرایط اقلیمی، نوع خاک، مدیریت‌های کشاورزی و خصوصیات پوشش گیاهی است و ممکن است در مناطق مختلف نتایج متفاوتی به همراه داشته باشد. به‌عنوان نمونه، تبدیل مراتع به اراضی زراعی در برخی مناطق با افزایش فرسایش خاک و کاهش ذخیره کربن همراه بوده، درحالی‌که جنگل‌کاری مجدد یا باغ‌کاری می‌تواند به تثبیت خاک و بهبود ذخایر کربنی کمک نماید. در مطالعه‌ای Chen و همکاران (۲۰۲۳) اثرات بلند مدت تغییرات کاربری زمین بر ویژگی‌های خاک را در مناطق مختلف جهان بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که تبدیل زمین بایر به باغ‌ها، باعث افزایش قابل توجه کربن آلی خاک و بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن می‌شود. این تغییرات موجب ارتقاء ظرفیت نگهداری رطوبت خاک و کاهش فرسایش می‌گردد. در مقاله‌ای دیگر، Tellen و Yerima (۲۰۱۸) دریافتند که تبدیل جنگل‌ها یا ساواناهای طبیعی به

اراضی کشاورزی سبب کاهش درصد سیلت، رطوبت، ماده آلی، کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر قابل جذب، اسیدیته و ظرفیت تبادل کاتیونی می‌شود. درعین حال، جرم مخصوص ظاهری، هدایت الکتریکی، اسیدیته قابل تبادل و درصد شن افزایش یافت.

در ایران نیز به‌ویژه در چند دهه اخیر، تغییرات گسترده‌ای در کاربری اراضی مختلف مشاهده شده که این موضوع اثرات جدی بر کیفیت و سلامت خاک، تولیدات کشاورزی و ثبات محیط زیست برجای گذاشته است (Hydari et al., 2020). Ebrahimi و همکاران (۲۰۱۶) در یک مطالعه موردی در منطقه تفتان دریافتند که تغییر کاربری اراضی مرتع به اراضی زراعی محتوای نیتروژن، فسفر و کربن آلی خاک را افزایش داد و درعین حال منجر به افزایش شوری و کاهش کربنات کلسیم خاک گردید. Javadi و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای در منطقه اشتهارد استان البرز گزارش کردند که تبدیل اراضی کشاورزی و باغی به زمین‌های رها شده و شورزار، به‌طور معنی‌داری کیفیت خاک را تنزل داده است؛ به‌گونه‌ای که کاهش محتوای ماده آلی، فسفر و نیتروژن کل همراه با افت تخلخل خاک مشاهده شد، درحالی‌که جرم مخصوص ظاهری، هدایت الکتریکی و غلظت پتاسیم خاک افزایش یافت. Samie و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند که تغییر کاربری اراضی از مهم‌ترین عوامل تخریب کیفیت خاک است و ویژگی‌هایی مانند ماده آلی، کلسیم کربنات معادل و پایداری ساختمان خاک بیشترین حساسیت را نسبت به تغییر کاربری نشان می‌دهند. Taghipour و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که تغییر کاربری اراضی در منطقه تونکابن استان گیلان منجر به ایجاد تفاوت‌های معنادار در کیفیت خاک شد. نتایج پژوهش آن‌ها بیانگر آن است که کاربری‌های جنگل و زراعی از نظر شاخص‌های کیفیت خاک در وضعیت مطلوب‌تری نسبت به کاربری مرتع قرار دارند.

در سال‌های اخیر، اگرچه مطالعات متعددی در ایران به بررسی اثرات تغییر کاربری اراضی بر ویژگی‌های خاک پرداخته‌اند، اما بررسی‌های دقیق در مقیاس محلی و با تمرکز بر شرایط اقلیمی و مدیریتی خاص هر منطقه همچنان ضروری است. منطقه لوشان در جنوب استان گیلان، باوجود تفاوت آشکار در اقلیم و رژیم رطوبتی خاک نسبت به نواحی مرطوب غالب استان "به‌ویژه قرارگیری آن در شرایط اریدیک" نمونه‌ای از چشم‌اندازهای خشک و نیمه‌خشک شمال کشور به‌شمار می‌رود که در سال‌های اخیر شاهد تبدیل اراضی بایر به باغ‌های زیتون بوده است. این تغییرات کاربری، به‌ویژه تحت تأثیر توسعه باغداری و مدیریت‌های محلی، می‌تواند پیامدهای متفاوتی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک نسبت به مناطق مرطوب‌تر داشته باشند؛ ازاین‌رو

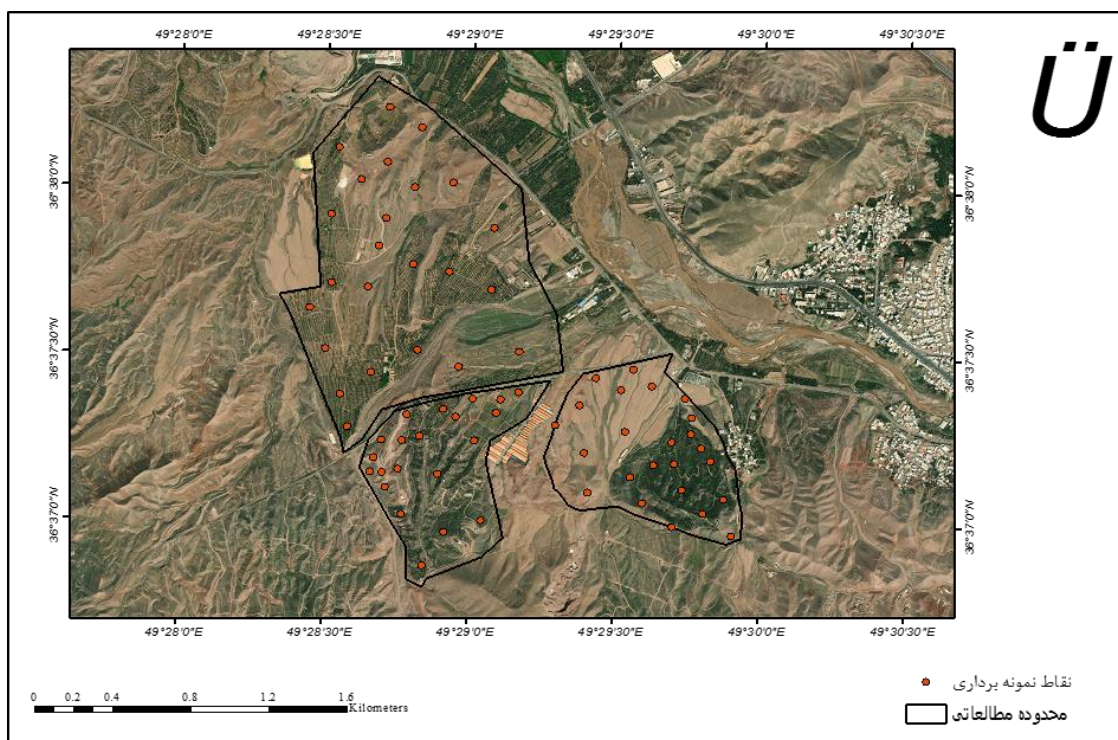
۴۹°۳۱' شرقی قرار دارد (شکل ۱). بر اساس داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی، میانگین بارندگی سالیانه منطقه حدود ۲۷۳ میلی‌متر، میانگین دمای سالیانه ۱۷ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی متوسط حدود ۶۰ درصد است. ارتفاع منطقه بین ۳۳۰ تا ۴۵۰ متر از سطح دریا متغیر بوده و از نظر رده‌بندی، خاک‌ها در رده انتی‌سول<sup>۱</sup> قرار می‌گیرند. اقلیم منطقه نیز از نوع نیمه‌خشک با ویژگی بارز کمبود بارندگی و خشکی نسبی هوا است.

پیش از نمونه‌برداری، بررسی‌های اولیه جهت اطمینان از یکسان بودن مواد مادری، موقعیت ژئومورفولوژیک و خصوصیات پایه‌ای خاک در هر دو کاربری انجام شد تا تغییرات مشاهده شده در ویژگی‌های خاک صرفاً ناشی از تفاوت کاربری (باغ زیتون و اراضی بایر) باشد و تفاوت‌های ذاتی خاک در نتایج دخالت نکنند.

ضرورت دارد تأثیر این تغییرات در چنین محیط‌های خشک شمالی به‌صورت منطقه محور ارزیابی شود. بر همین اساس، پژوهش حاضر باهدف بررسی تأثیر تبدیل اراضی بایر به باغ زیتون در لوشان، بر مجموعه‌ای از ویژگی‌های خاک انجام شد تا تصویری واقع بینانه از واکنش خاک این ناحیه به تغییر کاربری ارائه دهد.

## مواد و روش‌ها منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه شامل سه باغ زیتون به وسعت ۱۵۰ هکتار که حدود ۲۰ سال است تحت کشت زیتون قرار دارند و همچنین اراضی بایر مجاور آن با وسعتی حدود ۱۵۰ هکتار است. این اراضی در محدوده لوشان از توابع شهرستان رودبار در استان گیلان در شمال ایران واقع شده‌اند. مختصات جغرافیایی مرز محدوده مطالعه در سامانه UTM، زون ۳۹، بین عرض‌های جغرافیایی ۳۶°۳۷' تا ۳۶°۳۸' شمالی و طول‌های ۴۹°۲۸' تا



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه از توابع شهرستان رودبار در استان گیلان  
Fig 1. The study area located in the Rudbar County region of Gilan Province

<sup>1</sup> Entisols

## نمونه‌برداری و آنالیز خاک

به‌منظور بررسی اثر تغییر کاربری اراضی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، ۳ منطقه مطالعاتی نزدیک به هم که دارای مواد مادری یکسانی بودند، در نظر گرفته شد که هر منطقه شامل ۲ کاربری (زمین بایر و باغ زیتون) و ۱ فاکتور عمق (صفر تا ۳۰ سانتیمتری) بود. تعداد نمونه‌ها شامل، ۳ منطقه مطالعاتی  $2 \times$  کاربری (زمین بایر و باغ زیتون)  $\times$  ۱ فاکتور عمق  $\times$  ۱۲ تکرار بود که در مجموع شامل ۷۲ نمونه خاک جامعه آماری این مطالعه را تشکیل داد. نمونه‌برداری در ماه مهر سال ۱۴۰۳ انجام شد و نمونه‌های خاک به آزمایشگاه منتقل شده و در شرایط دمایی محیط هوا خشک شدند.

خصوصیات فیزیکی شامل؛ بافت خاک با استفاده از روش هیدرومتری (Gee et al., 1986)، جرم مخصوص ظاهری با روش کلوخه و پارافین (Blake and Hartge, 1986) و مقدار رس قابل انتشار در آب<sup>۱</sup> (DC) با استفاده از روش هیدرومتری (Gee et al., 1986) اندازه‌گیری شد. اسیدیته خاک در نسبت ۱:۱ خاک به آب اندازه‌گیری شد (Knudsen et al., 1982). قابلیت هدایت الکتریکی<sup>۲</sup> (EC) در عصاره اشباع اندازه‌گیری گردید (Rhoades, 1982). مقدار کربن آلی باروش واکلی و بلک (Walkley and Black, 1934)، نیتروژن کل با روش کجلدال (Bremner and Mulvaney, 1982) و فسفر قابل جذب با روش اولسن اندازه‌گیری شدند (Olsen et al., 1954). پتاسیم قابل جذب با استفاده از فلیم‌فتمتر (Knudsen et al., 1982) و مقادیر کلسیم و منیزیم محلول در عصاره اشباع با استفاده از روش کمپلکسومتری (Page et al., 1989) تعیین گردید. ظرفیت تبادل کاتیونی<sup>۳</sup> (CEC) نیز با روش استخراج با اسنات سدیم اندازه‌گیری شد (Bower et al., 1952).

برای ارزیابی ویژگی‌های زیستی خاک، نمونه‌ها با استفاده از تجهیزات استریل برداشت شده و مطابق با روش‌های استاندارد و تحت شرایط زنجیره سرد به محیط‌های مناسب انتقال داده شدند و تا زمان انجام آزمایش‌ها در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد در یخچال نگهداری شدند (Hydari et al., 2020). سپس تنفس پایه خاک<sup>۴</sup> (BR) از طریق تیتراسیون (Anderson, 1982) و نسبت میکروبی<sup>۵</sup> (MQ) به صورت نسبت کربن زیست‌توده میکروبی به کربن آلی خاک تعیین گردید. نسبت میکروبی نمایانگر بخش فعال کربن خاک است و به‌عنوان شاخص حساس به تغییرات مدیریت و کاربری برای ارزیابی کیفیت زیستی خاک

انتخاب‌شده است (Estefan et al., 2013).

ذخیره کربن آلی کل<sup>۶</sup> (CS) با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد (Poplau and Don, 2013):

$$CS = SOC \times BD \times D \times 10^4$$

که در این رابطه، CS: ذخیره کربن آلی خاک برحسب کیلوگرم بر هکتار، SOC: کربن آلی خاک برحسب درصد، BD: وزن مخصوص ظاهری خاک برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعب و D: عمق خاک برحسب متر است.

## تحلیل‌های آماری

تجزیه و تحلیل‌های آماری این پژوهش با استفاده از نرم‌افزارهای IBM SPSS Statistics و Microsoft Excel نسخه ۲۶ انجام شد. سطح معنی‌داری آزمون‌ها در تمامی موارد برابر با  $p < 0.01$  در نظر گرفته شد. برای بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها، از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف<sup>۷</sup> استفاده گردید. همچنین، به‌منظور ارزیابی همگنی واریانس‌ها، آزمون لون<sup>۸</sup> در محیط SPSS اجرا شد. پس از اطمینان از رعایت پیش‌فرض‌ها، مقایسه میانگین ویژگی‌های مختلف خاک بین کاربری‌های مورد مطالعه با استفاده از تحلیل واریانس یک‌طرفه<sup>۹</sup> صورت گرفت. در مواردی که اختلاف میانگین‌ها معنی‌دار بود، برای شناسایی دقیق‌تر گروه‌های متفاوت از آزمون تعقیبی دانکن<sup>۱۰</sup> استفاده گردید.

## نتایج و بحث

### ویژگی‌های شیمیایی خاک

#### کربن آلی

نتایج این مطالعه نشان داد که نوع کاربری اراضی تأثیر معنی‌داری بر محتوای کربن آلی خاک دارد ( $p < 0.01$ ). متوسط مقدار کربن آلی در باغ‌های زیتون (۱/۳ درصد) و در زمین‌های بایر (۰/۴۶ درصد) مشاهده شد که اختلافی چشمگیر را نشان می‌دهد (جدول ۱). به عبارتی تغییر کاربری از اراضی بایر به باغ زیتون موجب افزایش ۲/۸۲ برابری کربن آلی شده است (جدول ۱). بر اساس شکل (۲a) مقدار کربن آلی در باغ زیتون میانه بالاتری دارد و هم‌پوشانی آن با کاربری بایر بسیار کم است. بنابراین، افزایش کربن آلی در باغ زیتون کاملاً مشهود بوده و اثر تغییر کاربری بر بهبود ماده آلی خاک بسیار قوی و قابل اتکا است. افزایش ماده آلی در کاربری باغ زیتون، ناشی از ورود بیشتر بقایای گیاهی و کاربرد کودهای آلی است. در مقابل،

<sup>8</sup> Levene's Test

<sup>9</sup> One-way ANOVA

<sup>10</sup> Duncan's multiple range test

<sup>5</sup> Microbial ratio

<sup>6</sup> Carbon Storage

<sup>7</sup> Kolmogorov-Smirnov

<sup>1</sup> Water-dispersible clay

<sup>2</sup> Electrical conductivity

<sup>3</sup> Cation exchange capacity

<sup>4</sup> Basal respiration

شود. یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعات پیشین هم‌راستا است؛ برای نمونه، کاهش اسیدیته در پی تبدیل جنگل به اراضی زراعی یا باغی در مطالعاتی نظیر Yermia و Talan (۲۰۱۸) نیز گزارش شده است. با این حال، در مورد باغ‌های زیتون که عمدتاً در خاک‌های آهکی با اسیدیته بالاتر از ۷ رشد می‌کنند، کاهش محدود اسیدیته مشکلی از نظر رشد گیاه ایجاد نمی‌کند.

### قابلیت هدایت الکتریکی

بررسی آماری داده‌ها نشان داد که نوع کاربری اراضی بر مقدار قابلیت هدایت الکتریکی خاک اثرگذار است؛ به طوری که اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد بین کاربری‌های مختلف مشاهده شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار قابلیت هدایت الکتریکی در باغ‌های زیتون (۴/۰۹ دسی‌زیمنس بر متر) بوده و مقدار آن در اراضی بایر (۳/۴۲ دسی‌زیمنس بر متر) ثبت شده است (جدول ۱). این یافته‌ها نشان می‌دهد که تغییر کاربری از زمین‌های بایر به کاربری‌های کشاورزی، به‌ویژه باغ زیتون منجر به افزایش معنی‌دار قابلیت هدایت الکتریکی خاک می‌شود. تحلیل تغییرات نسبی افزایش ۱۹/۵۹ درصدی در باغ‌های زیتون را نسبت به اراضی بایر تأیید می‌کند (جدول ۱). شکل (۲c) نیز صحت نتایج فوق را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد قابلیت هدایت الکتریکی در باغ زیتون بیشتر است. علل این افزایش را می‌توان در بهره‌گیری از کودهای آلی و شیمیایی که حاوی مقادیر قابل توجهی نمک‌های محلول هستند جست‌وجو کرد. به‌ویژه در باغ‌ها، کاربرد مداوم این نهاده‌ها در کنار تجزیه مواد آلی خاک و تولید یون‌های قابل جذب، موجب افزایش غلظت املاح در محیط خاک شده است. همچنین، بالا بودن میزان کربن آلی خاک در این کاربری‌ها، به‌دلیل فعالیت بیشتر میکروبی و چرخه عناصر مغذی، نقشی مؤثر در افزایش قابلیت هدایت الکتریکی ایفا می‌کند. استفاده مستمر از آب آبیاری، عامل دیگری در انباشت املاح محلول و افزایش شوری خاک است. نتایج حاصل با مطالعات پیشین هم‌راستا است و بیانگر آن است که فعالیت‌های زراعی و باغی در مقایسه با اراضی بکر، پتانسیل بالاتری برای افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک دارند (Beheshti et al., 2011; Cotrufo et al., 2022). لذا در فرآیند توسعه کشاورزی و تبدیل اراضی بایر، لازم است مدیریت بهینه مصرف نهاده‌ها، آب و روش‌های خاک‌ورزی مد نظر قرار گیرد تا ضمن ارتقای باروری، از پیامدهای منفی تجمع املاح نیز پیشگیری شود.

فقر ماده آلی در زمین‌های بایر به کمبود رطوبت، محدودیت رشد گیاه و پوشش گیاهی ضعیف نسبت داده می‌شود (Beheshti et al., 2011).

شواهد متعدد از مطالعات جهانی نشان می‌دهد که تبدیل کاربری‌های طبیعی به اراضی کشاورزی و باغی منجر به کاهش کربن آلی و نیتروژن کل خاک می‌شود (Xia et al., 2024; Li et al., 2024). با این حال، یافته‌های حاضر حاکی از آن است که در مناطق نیمه خشک، تبدیل اراضی بایر به کاربری‌های زراعی مدیریت شده می‌تواند موجب بهبود محتوای ماده آلی و ارتقای کیفیت خاک شود. این نتایج با مطالعات مشابه در مناطق خشک و گرمسیری مطابقت دارد که بر نقش احیای کاربری‌های پایدار در حفظ و افزایش مواد آلی خاک تأکید دارند (Wang, 2019; Nanganoa et al., 2019). همکاران (Buraka و همکاران (۲۰۲۲) نیز در نتیجه پژوهش خود بر روی اثر تغییر کاربری بر خصوصیات خاک به این نتیجه دست یافتند که جنگل‌کاری و تلاش برای احیای جنگل و تبدیل زمین از کشاورزی به اکوسیستم‌های طبیعی سبب بهبود خواص خاک می‌شود. آن‌ها اعلام کردند این تغییرات باعث افزایش محتوای مواد آلی، افزایش چرخه مواد مغذی، بهبود ساختمان خاک و ارتقای تنوع میکروبی و کمک به سلامت و پایداری خاک می‌شود.

### اسیدیته خاک

یافته‌های این پژوهش نشان داد که نوع کاربری اراضی تأثیر معناداری بر اسیدیته خاک نداشته و این تفاوت در سطح احتمال ۱ درصد قابل تشخیص نیست. بر اساس نتایج به‌دست آمده، مقدار اسیدیته در اراضی بایر (۸/۴۲) و مقدار آن در باغ زیتون (۸/۳۰) ثبت شد (جدول ۱). به‌طور کلی، تغییر کاربری از زمین‌های بایر به باغ زیتون و شالیزار با کاهش اسیدیته به مقدار حدود ۱/۴ درصد همراه بوده است (جدول ۱). شکل (۲b) نیز صحت این نتایج را تأیید می‌کند و هم‌پوشانی نمودارهای جعبه‌ای و درصد تغییر ناچیز، بیانگر آن است که اثر کاربری بر مقدار اسیدیته بسیار محدود است. افزایش ماده آلی و بقایای گیاهی حاصل از فعالیت‌های کشاورزی، به‌ویژه در باغ‌های زیتون، در کنار مدیریت آبیاری، از عوامل مؤثر در تعدیل اسیدیته محسوب می‌شوند. اسیدیته خاک که شاخصی کلیدی در سنجش حاصلخیزی و دسترس گیاه به عناصر غذایی است، می‌تواند تحت تأثیر مداخلات انسانی و تغییر در نوع بهره‌برداری از زمین دچار تغییرات چشمگیری شود. همچنین، کاهش اسیدیته به‌ویژه در شرایطی که با افزایش تجزیه ماده آلی و فعالیت میکروبی همراه باشد، ممکن است منجر به کاهش ذخایر کربن آلی خاک

جدول ۱- مقایسه میانگین ویژگی‌های شیمیایی خاک در انواع مختلف کاربری  
 Table 1. Comparison of the mean chemical properties of soil under different land-use types

ذخیره کربن	منیزیم محلول	کلسیم محلول	پتاسیم قابل جذب	فسفر قابل جذب	نیتروژن کل	کربنات کلسیم	ظرفیت تبادل کاتیونی	قابلیت هدایت الکتریکی	اسیدیته خاک	کربن آلی	کاربری Land-Use
Cs	Soluble Mg	Soluble Ca	Available K	Available P	Total N	CaCo3	CEC	EC	pH	OC	
(kg/ha)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/kg)	(mg/kg)	درصد (%)	درصد (%)	(Cmole bar /kg)	(dS/m)	-	درصد (%)	
33452 <sup>a</sup>	13.40 <sup>a</sup>	26.81 <sup>a</sup>	105.26 <sup>a</sup>	13.39 <sup>a</sup>	0.20 <sup>a</sup>	28.62 <sup>a</sup>	30.33 <sup>a</sup>	4.09 <sup>a</sup>	8.30 <sup>a</sup>	1.30 <sup>a</sup>	باغ زیتون Olive Orchard
12533.43 <sub>b</sub>	3.43 <sup>b</sup>	9.21 <sup>b</sup>	13.61 <sup>b</sup>	11.31 <sup>b</sup>	0.07 <sup>b</sup>	22.08 <sup>b</sup>	22.28 <sup>b</sup>	3.42 <sup>b</sup>	8.42 <sup>a</sup>	0.46 <sup>b</sup>	بایر Bare
+166.76	+290.67	+190.98	+673.52	+18.42	+185.71	+29.64	+7.48	+19.59	-1.43	+182.61	درصد تغییرات در اثر تغییر کاربری به باغ زیتون changes resulting from land-use conversion to olive orchards

میانگین‌های دارای حروف غیر مشترک در هر ستون، اختلاف معنی‌دار دارند ( $P < 0.01$ ).

Means with different letters in each column indicate significant differences at the 1% probability level ( $P < 0.01$ )

### ظرفیت تبادل کاتیونی

یکی از ویژگی‌های شیمیایی مهم مورد بررسی در این تحقیق ظرفیت تبادل کاتیونی است. نتایج مقایسه میانگین نشان داد بین مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی در کاربری‌های بایر و باغ زیتون، اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد وجود دارد (جدول ۱). با توجه به تغییرات نسبی ظرفیت تبادل کاتیونی در کاربری‌های مختلف مشاهده می‌شود که با تغییر کاربری از اراضی بایر باغ زیتون مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی به مقدار ۷/۴۸ درصد افزایش یافته است. شکل (۲d) نیز صحت این نتایج را تأیید می‌کند و بیانگر ارتقای ظرفیت تبادل کاتیونی در اثر تغییر کاربری از بایر به باغ زیتون است.

رس‌ها و مواد آلی خاک به علت سطح ویژه زیاد و باردار بودن نقش مهمی در مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی دارند و با افزایش مقدار رس و مواد آلی خاک مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی افزایش می‌یابد. مطالعات نشان داده با افزایش مقدار ماده آلی و رس در خاک، تعداد بارهای منفی و در نتیجه مکان‌های قابل تبادل در خاک افزایش می‌یابد و این موضوع افزایش تبادل کاتیونی خاک را در پی دارد (Solly et al., 2020). یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر مقدار بر ظرفیت تبادل کاتیونی مقدار ماده آلی است به طوری که گفته می‌شود در خاک‌ها حدود ۲۰ تا ۸۰ درصد از ظرفیت تبادل کاتیونی ناشی از ماده آلی است (Krogh et al., 2000). مطالعات متعددی نیز تأثیر مثبت مواد آلی بر ظرفیت تبادل کاتیونی خاک را گزارش کرده‌اند

(Ramos et al., 2018; Solly et al., 2020). نتایج مطالعه

حاضر نشان می‌دهد که افزایش غلظت کربن آلی خاک به دنبال تغییر کاربری از اراضی بایر به باغ زیتون بر ظرفیت تبادل کاتیونی خاک تأثیر می‌گذارد، به طوری که افزایش ماده آلی سبب افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی شده است؛ بنابراین می‌توان گفت افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی در باغ زیتون می‌تواند ناشی از مقادیر بالاتر ماده آلی در این کاربری نسبت به کاربری بایر باشد. Guibert و همکاران (۱۹۹۹) معتقدند تأثیر حضور مواد آلی بر تبادل کاتیونی خاک، به کلاس بافتی خاک و مقدار حضور رس و ذرات درشت‌تر بستگی دارد. آن‌ها مشاهده کردند که مقدار تأثیر حضور مواد آلی بر ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در خاک‌های درشت‌بافت در مقایسه با خاک‌های ریزبافت بیشتر قابل مشاهده است. همان‌طور که عنوان شد، علاوه بر مقدار مواد آلی، مقدار رس نیز از فاکتورهای بسیار مهم در ظرفیت تبادل کاتیونی خاک است. در این تحقیق مشاهده شد با وجود کلاس بافتی مشابه بین دو کاربری، اجزای تشکیل‌دهنده بافت خاک یعنی رس، سیلت و شن نسبت به هم تا حدودی متفاوت‌اند و مقدار رس در کاربری باغ زیتون نسبت به خاک بکر بیشتر است؛ بنابراین می‌توان احتمال داد این افزایش مقدار رس توانسته تا حدودی بر ظرفیت تبادل کاتیونی تأثیر گذار باشد. Leul و همکاران (۲۰۲۳) نیز در نتیجه مطالعه‌ای اعلام کردند بین مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی با درصد رس همبستگی مثبت معنی‌دار و قوی وجود دارد.

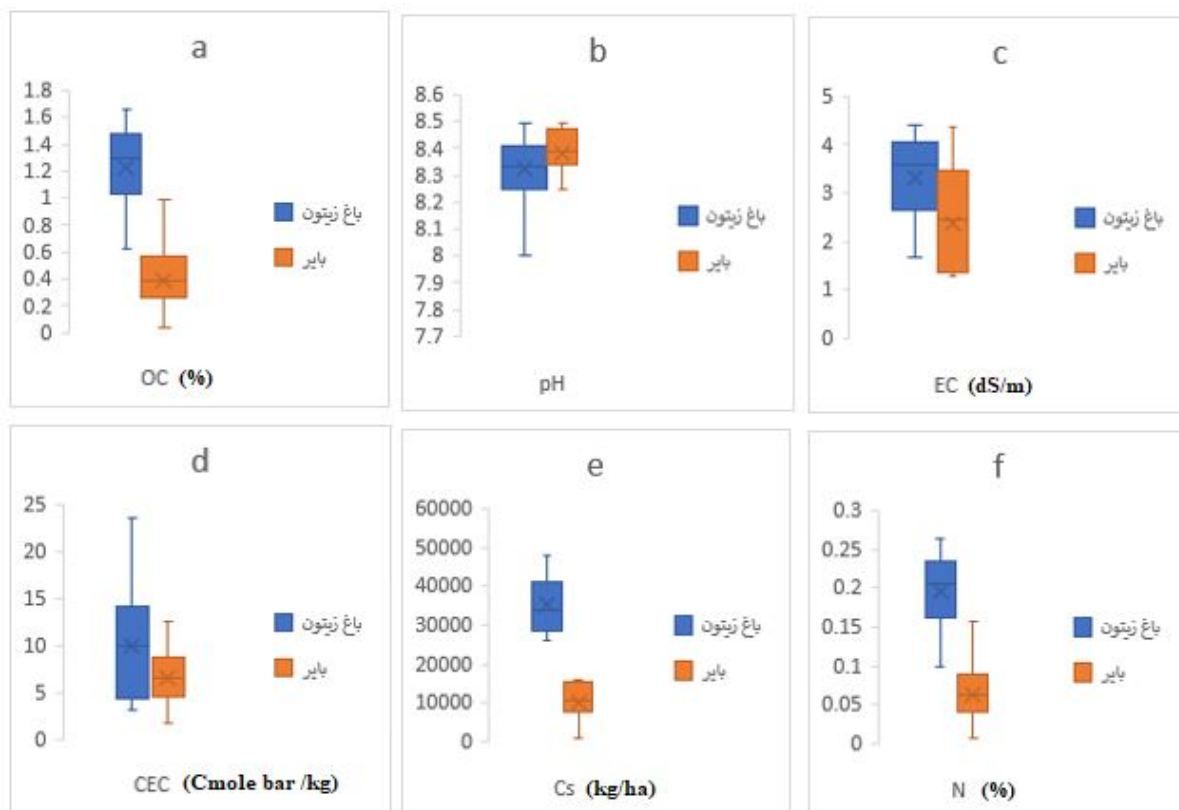
## ذخیره کربن

نتایج مقایسه میانگین بیانگر آن است که مقدار ذخیره کربن در کاربری‌های بایر و باغ زیتون دارای تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال یک در صد است (جدول ۱). تغییرات نسبی مقدار ذخیره کربن در کاربری‌های مختلف نشان می‌دهد که با تغییر کاربری از بایر به باغ زیتون مقدار ذخیره کربن در خاک ۲/۶۶ برابر شده است (جدول ۱). نمودار جعبه‌ای مربوط به مقایسه مقادیر ذخیره کربن نیز نشان می‌دهد تغییر کاربری زمین از بایر به باغ زیتون می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر ذخیره کربن خاک داشته باشد (شکل ۲e). این اثرات به دلیل تغییرات در پوشش گیاهی، نوع مدیریت زمین و فرآیندهای زیستی و شیمیایی خاک اتفاق می‌افتد.

درختان زیتون به دلیل سیستم ریشه‌ای عمیق و استفاده طولانی مدت از زمین، می‌توانند باعث افزایش ذخیره کربن در خاک شوند. علاوه بر این برگ‌ها و بقایای گیاهی که به سطح خاک می‌ریزند، به تدریج تجزیه شده و به مواد آلی خاک اضافه می‌شوند که منجر به افزایش ذخیره کربن خاک می‌شوند. همچنین نوع مدیریت باغ (مانند استفاده از کودهای آلی، آبیاری و هرس درختان) می‌تواند تأثیرات مختلفی بر ذخیره کربن خاک داشته باشد. در مقابل، در زمین‌های بایر به دلیل کمبود پوشش گیاهی و در نتیجه آن کاهش تولید بیوماس و همچنین عدم وجود مدیریت مناسب، خاک معمولاً دارای مقادیر کمتری از کربن آلی است. به علاوه شرایط خشک و نیمه‌خشک این مناطق باعث می‌شود که تجزیه مواد آلی با سرعت بالاتری انجام شود و در نتیجه ذخیره کربن آلی خاک در این مناطق کم باشد؛ بنابراین با تغییر کاربری به باغ زیتون، افزایش چشمگیری در ذخیره کربن خاک می‌توان انتظار داشت، زیرا این تغییر در کاربری باعث افزایش ورود مواد آلی به خاک می‌شود و همچنین شرایط محیطی متفاوتی را ایجاد می‌کند که می‌تواند به حفظ یا افزایش کربن در خاک کمک کند.

به‌طور کلی عقیده بر این است که کاربری اراضی و

مدیریت آن بر میزان کربن آلی ذخیره‌شده در خاک تأثیر می‌گذارد. تبدیل یک اکوسیستم طبیعی به اراضی زراعی و باغی می‌تواند مقدار ماده آلی تثبیت شده در خاک را کاهش دهد (Adiyah et al., 2022). در مقابل استفاده بهینه از اراضی مانند تبدیل مزارع نامرغوب و زمین‌های بایر به جنگل‌ها یا مراتع و باغات می‌تواند به بهبود ذخیره کربن منجر شود و در نهایت از مقدار دی‌اکسید کربن جو بکاهد که این موضوع می‌تواند اثرات سونامی از تغییرات اقلیمی را نیز کاهش دهد. با این وجود چنین تأثیراتی به طیف وسیعی از ویژگی‌های خاک مانند حاصلخیزی، جرم مخصوص ظاهری و میزان تأمین رطوبت خاک بستگی دارد (De Rosa et al., 2024; Eze et al., 2023). مطالعات نشان داده‌اند نرخ ترسیب کربن آلی خاک و پتانسیل ترسیب آن برای جنگل‌ها و پس از آن علفزارها، باغ‌ها و سایر انواع کاربری اراضی بالاترین میزان است. اکوسیستم‌های بدون دخالت انسان مانند جنگل‌ها و مراتع نقش مهمی در ذخیره طولانی مدت کربن در خاک دارند و این ذخایر می‌توانند تحت تأثیر منفی تبدیل کاربری زمین و تغییرات آب و هوایی قرار گیرند (Kooch et al., 2022). Li و همکاران (۲۰۲۴) در نتیجه تحقیق خود اعلام کردند کاشت گیاهان پوششی و ترکیب بقایای آن‌ها در خاک می‌تواند از دست دادن کربن آلی خاک ناشی از تغییر کاربری را جبران کند؛ مانند یافته‌های ما، چندین مطالعه ارتباط قوی بین مقدار ذخیره کربن آلی خاک نسبت به تغییرات کاربری را گزارش کرده‌اند. برای مثال Wang و همکاران (۲۰۱۸) در نتیجه تحقیق خود بر روی اثر تغییرات کاربری بر ذخیره کربن و سایر ویژگی‌های خاک اعلام کردند هرگونه تلاش برای کاهش تلفات کربن آلی خاک از طریق تغییر مدیریت در کاربری‌های مختلف به جذب کربن بیشتر در اکوسیستم‌های زمینی کمک می‌کند؛ بنابراین تغییر در کاربری در جهت مثبت و احیای پوشش‌های گیاهی می‌تواند باعث افزایش محتوای مواد آلی، افزایش چرخه مواد مغذی، بهبود ساختمان خاک و ارتقای تنوع میکروبی و کمک به سلامت و پایداری خاک شود.



شکل ۲- توزیع کمی برخی خصوصیات شیمیایی در خاک باغ زیتون و اراضی. در باکس پلات‌ها، خط میانه نمایانگر میانه داده‌ها است، لبه‌های باکس نشان‌دهنده چارک اول ( $Q_1$ ) و چارک سوم ( $Q_3$ ) هستند، و خط‌های خارج از باکس حداقل و حداکثر مقادیر را نشان می‌دهند.  
**Fig 2. Quantitative distribution of selected chemical properties in olive orchard and barren soils. In the box plots, the line inside the box represents the median, the edges of the box indicate the first ( $Q_1$ ) and third ( $Q_3$ ) quartiles, and the whiskers show the minimum and maximum values.**

پیشین است که کاهش نیتروژن در کاربری بایر را به نبود پوشش گیاهی، فقر ماده آلی و افزایش فرسایش نسبت داده‌اند (Zhang et al., 2019; Zhu et al., 2024). در مجموع، نتایج این پژوهش تأکید می‌کند که تغییر کاربری از بایر به سیستم‌های زراعی پایدار، به‌ویژه باغ زیتون، می‌تواند ذخیره نیتروژن خاک را افزایش داده و از طریق بهبود حاصلخیزی، موجب ارتقای کیفیت خاک شود. با این وجود، مدیریت دقیق مصرف کود و منابع نیتروژنی برای جلوگیری از اتلاف و پیامدهای زیست‌محیطی ضروری است.

### فسفر قابل جذب

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که نوع کاربری زمین تأثیر معنی‌داری بر غلظت فسفر خاک دارد ( $p < 0.01$ ) به طوری که مقدار فسفر قابل جذب در باغ زیتون (۱۳/۳۹ میلی گرم بر کیلوگرم) و در زمین‌های بایر (۱۱/۳۱ میلی گرم بر کیلوگرم) مشاهده شد (جدول ۱). به عبارتی، تغییر کاربری از اراضی بایر به باغ زیتون موجب افزایش ۱۸/۴۲ درصدی فسفر خاک گردید (جدول ۱). بررسی نمودارهای جعبه‌ای نیز این الگو

### نیتروژن کل

نتایج حاصل از مقایسه میانگین نشان داد که نیتروژن کل خاک به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر نوع کاربری زمین قرار دارد ( $p < 0.01$ )، به طوری که مقدار نیتروژن در باغ‌های زیتون به مقدار ۰/۲۰ در صد و میزان آن در اراضی بایر ۰/۰۷ در صد ثبت شد (جدول ۱). همان‌طور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود، تغییر کاربری از اراضی بایر به باغ زیتون موجب افزایش ۲/۸۵ برابری نیتروژن کل شد که بیانگر تأثیر مثبت استفاده کشاورزی مدیریت‌شده بر وضعیت نیتروژن خاک است. شکل (۲f) نیز صحت این نتایج را تأیید می‌کند و نشان‌دهنده افزایش مقدار نیتروژن کل در اثر تغییر کاربری از بایر به باغ زیتون است. افزایش نیتروژن در اثر تغییر کاربری به باغ زیتون عمدتاً به دلیل ورود ماده آلی غنی از نیتروژن، کاربرد کودهای آلی و معدنی و بهبود مدیریت آب‌و‌خاک است. علاوه بر این در باغ‌های زیتون استفاده از کودهای نیتروژنی رایج است و همراه با پوشش گیاهی پایدار و مدیریت بهینه، موجب بهبود وضعیت نیتروژن خاک نسبت به اراضی بایر می‌گردد. این یافته‌ها هم‌راستا با مطالعات

### کلسیم و منیزیم محلول

با توجه به نتایج مقایسه میانگین مقدار کلسیم و منیزیم در کاربری‌های مختلف باهم تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال یک در صد دارد و مقدار آن‌ها به ترتیب از مقدار ۹/۲۱ و ۳/۴۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک در اراضی بایر به ۲۶/۸۱ و ۱۳/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک در باغ‌های زیتون افزایش یافت (جدول ۱). به عبارتی مقدار کلسیم و منیزیم خاک در اثر تغییر کاربری از اراضی بایر به باغ زیتون به ترتیب به مقدار ۳/۹۱ و ۲/۹۱ برابر افزایش یافت (جدول ۱). شکل‌های ۳c و ۳d نیز صحت این نتایج را تأیید می‌کند و نشان دهنده افزایش مقدار کلسیم و منیزیم محلول در اثر تغییر کاربری از بایر به باغ زیتون هستند.

تغییر کاربری زمین می‌تواند تأثیرات مختلفی بر مقدار کلسیم و منیزیم در خاک داشته باشد. این تغییرات بستگی به مدیریت زمین، نوع کودهای مورد استفاده و ویژگی‌های شیمیایی خاک دارد (Kooch et al., 2022). در زمین‌های بایر، معمولاً سطح کلسیم و منیزیم در خاک پایین است. این می‌تواند به دلیل کمبود مواد آلی، کمبود تجزیه و چرخه عناصر غذایی و یا فرسایش خاک باشد؛ اما در مقابل در باغ‌های زیتون، استفاده از کودهای آلی مانند کمپوست و نیز کودهای شیمیایی می‌تواند به افزایش مقدار کلسیم و منیزیم در خاک کمک کند. همچنین حضور درختان زیتون که پوشش گیاهی دائمی ایجاد می‌کنند، می‌تواند فرسایش خاک را کاهش داده و باعث حفظ و تثبیت عناصر غذایی مانند کلسیم و منیزیم شود (Ferreira et al., 2016). افزایش مقدار کلسیم و منیزیم در اثر تغییر کاربری به زمین‌های زراعی توسط Pierrri Castilho و همکاران (۲۰۱۶) گزارش شده است. Leul و همکاران (۲۰۲۳) نیز در نتیجه مطالعه خود بر روی اثر تغییرات کاربری اراضی بر ویژگی‌های خاک اعلام کردند که برخی از ویژگی‌های کیفیت خاک، مانند ماده آلی، نیتروژن کل، جرم مخصوص ظاهری، تخلخل، ظرفیت تبادل کاتیونی، کلسیم و منیزیم قابل تبادل، در مقایسه با خاک‌های بکر جنگلی به‌عنوان شاهد (در سطح معنی‌داری  $P < 0.01$ ) تحت تأثیر قرار گرفته‌اند.

### کربنات کلسیم معادل

نتایج مقایسه میانگین نشان می‌دهد که تغییر کاربری اراضی بر میزان کربنات کلسیم معادل تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال ۱ در صد داشته و در اثر تبدیل اراضی بایر به باغ زیتون مقدار کربنات کلسیم معادل در خاک ۲۹/۶۷ در صد افزایش یافته است (جدول ۱). نمودارهای جعبه‌ای نیز این الگو را تأیید می‌

را تأیید می‌کند و مقدار میانه فسفر قابل جذب در باغ زیتون بالاتر از اراضی بایر قرار دارد که نشان می‌دهد مقدار آن در باغ زیتون به‌طور سیستماتیک در سطحی بالاتر از زمین بایر قرار دارد (شکل ۳a).

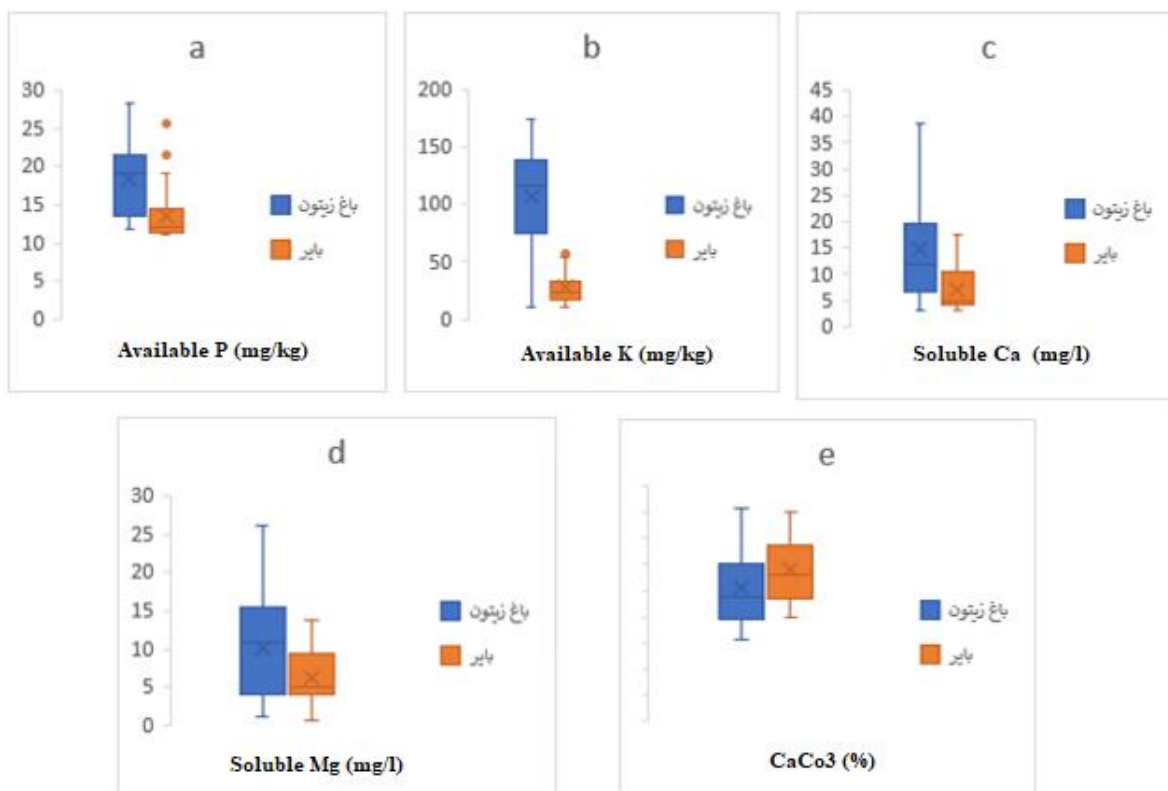
افزایش فسفر قابل جذب در اثر تغییر کاربری از اراضی بایر به باغ زیتون را می‌توان به بهبود مدیریت خاک، افزودن کودهای آلی و شیمیایی و ارتقای شرایط زیستی خاک نسبت داد. اراضی بایر به دلیل محدودیت پوشش گیاهی، افت مواد آلی و افزایش فرسایش سطحی معمولاً از نظر فسفر فقیر هستند. در مقابل، مدیریت زراعی در کاربری‌های کشاورزی، به‌ویژه در باغ‌های زیتون، از طریق افزودن کودها و بهبود ساختار خاک، موجب افزایش فسفر می‌شود. در باغ‌های زیتون کاربرد منظم کود و وجود پوشش دائمی گیاهی نقش مهمی در کاهش فرسایش و نگهداری عناصر غذایی از جمله فسفر ایفا می‌کند (McGrath et al., 2001). این یافته‌ها نشان می‌دهد که تغییر کاربری از زمین‌های بایر به اراضی زراعی مدیریت شده می‌تواند منجر به افزایش فسفر خاک و بهبود کیفیت آن شود، مشروط بر آن‌که مصرف کود و مدیریت آب و خاک به‌درستی انجام گیرد.

### پتاسیم قابل جذب

بر اساس نتایج مقایسه میانگین، تغییر کاربری اراضی اثر معنی‌داری بر میزان پتاسیم خاک دارد ( $p < 0.01$ ). تغییر کاربری از زمین‌های بایر به باغ زیتون باعث افزایش ۷/۷۴ برابری غلظت پتاسیم در خاک گردید که نشانگر تأثیر مثبت این تغییرات بر بهبود وضعیت پتاسیم خاک است (جدول ۱). اختلاف بسیار زیاد مقدار پتاسیم محلول بین دو کاربری بایر و باغ زیتون در شکل (۳b) نیز مشاهده می‌شود. افزایش پتاسیم در کاربری‌های زراعی را می‌توان به مصرف منظم کودهای پتاسیمی، مدیریت بهینه خاک و آب و افزایش فعالیت‌های زراعی نسبت داد. باغ‌های زیتون به دلیل نیاز بالای گیاه به پتاسیم برای رشد و افزایش کیفیت میوه، معمولاً با کودهای پتاسه تغذیه می‌شوند. در مقابل، اراضی بایر به دلیل پوشش گیاهی محدود، کمبود مواد آلی و فرسایش سطحی، از نظر ذخیره عناصر غذایی نظیر پتاسیم فقیر هستند (Hydari et al., 2020). نتایج این مطالعه با یافته‌های Levy و همکاران (۲۰۱۸) و سایر مطالعات مانند Tellen و Yermia (۲۰۱۸) و Yuan و همکاران (۲۰۲۴) همخوانی دارد. این مطالعات نیز نشان داده‌اند که تغییر کاربری اراضی از وضعیت طبیعی و بکر به کاربری‌های کشاورزی می‌تواند موجب تغییرات قابل توجه در سطح عناصر غذایی خاک، از جمله پتاسیم شود.

در کاربری باغ زیتون نسبت به اراضی بایر می‌توان به عملیات کشت و کار درخت‌های زیتون که موجب اختلاط خاک‌های زیرین که دارای کربنات کلسیم معادل نسبتاً بیشتری نسبت به خاک رویی می‌باشند، اشاره کرد. مطالعات زیادی بر روی تأثیر تغییر کاربری اراضی بر مقدار کربنات کلسیم معادل خاک انجام شده است که نتایج آن‌ها نشان می‌دهد تغییر کاربری اراضی سبب ایجاد تغییرات معنی‌دار در مقدار کربنات کلسیم معادل شده است (Pichand et al. 2017).

کنند و نشان می‌دهند مقدار کربنات کلسیم معادل در باغ زیتون بیشتر از اراضی بایر است (شکل ۳e). میزان کربنات کلسیم معادل اغلب به جنس مواد مادری خاک بستگی دارد. از آنجایی که بررسی‌های اولیه صورت گرفته روی خاک منطقه نشان داده است خاک مناطق نمونه‌برداری شده مواد مادری تقریباً یکسانی داشتند، بنابراین می‌توان تغییر در مقدار کربنات کلسیم معادل را به تغییر کاربری اراضی مرتبط دانست. Nanganoa و همکاران (۲۰۱۹) نیز گزارش کردند که اختلاف معنی‌داری در میزان کربنات کلسیم معادل خاک پس از تغییر کاربری اراضی از جنگل به مرتع و زراعت وجود دارد. از دلایل افزایش مقدار آهک خاک



شکل ۳- توزیع کمی برخی خصوصیات شیمیایی در خاک باغ زیتون و اراضی. در باکس پلات‌ها، خط میانه نمایانگر میانه داده‌ها است، لبه‌های باکس نشان‌دهنده چارک اول ( $Q_1$ ) و چارک سوم ( $Q_3$ ) هستند، و خط‌های خارج از باکس حداقل و حداکثر مقادیر را نشان می‌دهند.  
**Fig 3. Quantitative distribution of selected chemical properties in olive orchard and barren soils. In the box plots, the line inside the box represents the median, the edges of the box indicate the first ( $Q_1$ ) and third ( $Q_3$ ) quartiles, and the whiskers show the minimum and maximum values**

بافت در هر دو کاربری همچنان در رده لوم رسی (Clay Loam) قرار می‌گیرد (جدول ۲). تفاوت‌های مشاهده شده در درصد ذرات خاک را می‌توان به تأثیر فرایندهای سطحی و مدیریتی ناشی از تغییر کاربری نسبت داد، نه به تغییر ماده مادری یا دگرگونی بلندمدت بافت خاک. مطابق (جدول ۲)، تغییر کاربری از بایر به باغ زیتون در لایه سطحی مورد نمونه‌برداری

### ویژگی‌های فیزیکی خاک بافت خاک

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که تغییر کاربری از اراضی بایر به باغ زیتون موجب ایجاد تفاوت‌هایی در درصد رس، سیلت و شن در لایه سطحی خاک شده است؛ با این حال، این تغییرات از نظر آماری معنی‌دار نبوده و الگوی کلی طبقه‌بندی

زیتون می‌تواند ناشی از انتقال ذرات توسط آب آبیاری و رسوب‌گذاری در باغ، فرسایش انتخابی ذرات درشت‌تر و اختلاط خاک در عملیات مدیریتی باغ نیز باشد (Miju et al., 2025; Sun et al., 2016). پژوهش‌ها نشان می‌دهند که مدیریت ماده آلی و آبیاری می‌تواند ساختمان خاک سطحی را بهبود بخشد و توزیع اندازه ذرات را تحت تأثیر قرار دهد (Joshi and Garkoti, 2023). با توجه به مقیاس محدود منطقه مطالعه، تفاوت‌های مشاهده‌شده احتمالاً ناشی از عوامل محیطی گسترده‌تر نیستند و عمدتاً در سطح فرآیندهای فیزیکی سطح خاک قابل تبیین‌اند. در مجموع، تغییر کاربری می‌تواند از طریق اثر بر ساختمان خاک، پایداری خاک‌دانه‌ها، فرسایش، ماده آلی و فعالیت مدیریتی، سبب تغییر در توزیع ذرات در لایه سطحی نمونه‌برداری‌شده شود، بدون آنکه ماهیت بافت ژنتیکی خاک تغییر یابد (Torres et al., 2020). این یافته‌ها یک دید جامع‌تر از مکانیسم‌های متنوع تغییر بافت خاک در پاسخ به تغییر کاربری ارائه می‌دهند و نشان می‌دهند که اثرات کوتاه مدت مدیریتی می‌توانند توزیع ذرات سطحی را تحت تأثیر قرار دهند، حتی در شرایطی که بافت اصلی خاک ثابت باقی می‌ماند.

موجب افزایش مقدار رس به میزان ۳/۰۱ درصد و افزایش سیلت به میزان ۵/۶۸ درصد شده و در مقابل، مقدار شن کاهش یافته و در باغ زیتون حدود ۹/۹۹ درصد کمتر از اراضی بایر است. شکل‌های ۳a، ۳b و ۳c نیز این الگو را تأیید می‌کنند؛ به‌گونه‌ای که در کاربری باغ زیتون پراکنش داده‌ها منظم‌تر بوده و میانه مقادیر رس و سیلت در سطحی بالاتر نسبت به کاربری بایر قرار گرفته است، درحالی‌که میزان شن در باغ زیتون دارای دامنه کمتر و تمرکز بیشتری در مقادیر پایین‌تر است. این امر نشان می‌دهد که کاربری باغ زیتون از پایداری بیشتر در بخش سطحی خاک برخوردار است.

تغییرات مشاهده شده می‌تواند ناشی از چند مکانیسم هم‌زمان باشد: در اراضی بایر، ضعف ساختمان خاک، فقدان ماده آلی، نبود شبکه ریشه‌ای و فرسایش سطحی موجب افزایش رس قابل انتشار و شست‌وشوی آن شده و به کاهش نسبی رس و سیلت در سطح خاک منجر می‌شود. در مقابل، در باغ‌های زیتون حضور ماده آلی، فعالیت ریشه‌ها و پایداری بیشتر خاک‌دانه‌ها باعث حفظ رس و سیلت در لایه سطحی و جلوگیری از تجزیه و انتقال ذرات ریز می‌شود. علاوه بر این، افزایش رس و سیلت در باغ

جدول ۲- مقایسه میانگین ویژگی‌های فیزیکی خاک در انواع مختلف کاربری

Table 2. Comparison of the mean physical properties of soil under different land-use types

رس قابل انتشار Dispersible clay درصد (%)	جرم مخصوص ظاهری Bulk density (g/m <sup>3</sup> )	شن Sand درصد (%)	سیلت Silt درصد (%)	رس Clay درصد (%)	نوع کاربری Land-Use
22.87 <sup>b</sup>	1.28 <sup>b</sup>	27.06 <sup>a</sup>	35.33 <sup>a</sup>	37.60 <sup>a</sup>	باغ زیتون Olive Orchard
30.56 <sup>a</sup>	1.35 <sup>a</sup>	30.06 <sup>a</sup>	33.43 <sup>a</sup>	36.50 <sup>a</sup>	بایر Bare
-25.18	-5.19	-9.99	+5.68	+3.01	درصد تغییرات در اثر تغییر کاربری به باغ زیتون Percentage change due to land-use conversion to olive orchard

میانگین‌های دارای حروف غیر مشترک در هر ستون، اختلاف معنی‌دار دارند ( $P < 0.01$ ).

Means with different letters within each column are significantly different ( $P < 0.01$ )

اثر مدیریت کاربری بر ویژگی‌های فیزیکی خاک است، زیرا نوع پوشش گیاهی، میزان ماده آلی و شدت فعالیت‌های مدیریتی، نقش تعیین‌کننده‌ای در تغییر ساختمان و تخلخل خاک دارند. این وضعیت می‌تواند ناشی از افزایش ماده آلی، فعالیت ریشه‌ای بیشتر و تجمع بقایای گیاهی در باغ زیتون باشد؛ عواملی که علاوه بر افزایش منافذ ریز، موجب پایداری بیشتر خاک‌دانه‌ها می‌شوند. در مقابل، خاک کاربری بایر به دلیل کاهش ماده آلی و نبود پوشش گیاهی، مستعد تخریب ساختمان خاک، شکست خاک‌دانه‌ها و پر شدن خلل و فرج توسط ذرات حاصل از فرسایش است که همگی منجر به افزایش جرم مخصوص

### جرم مخصوص ظاهری

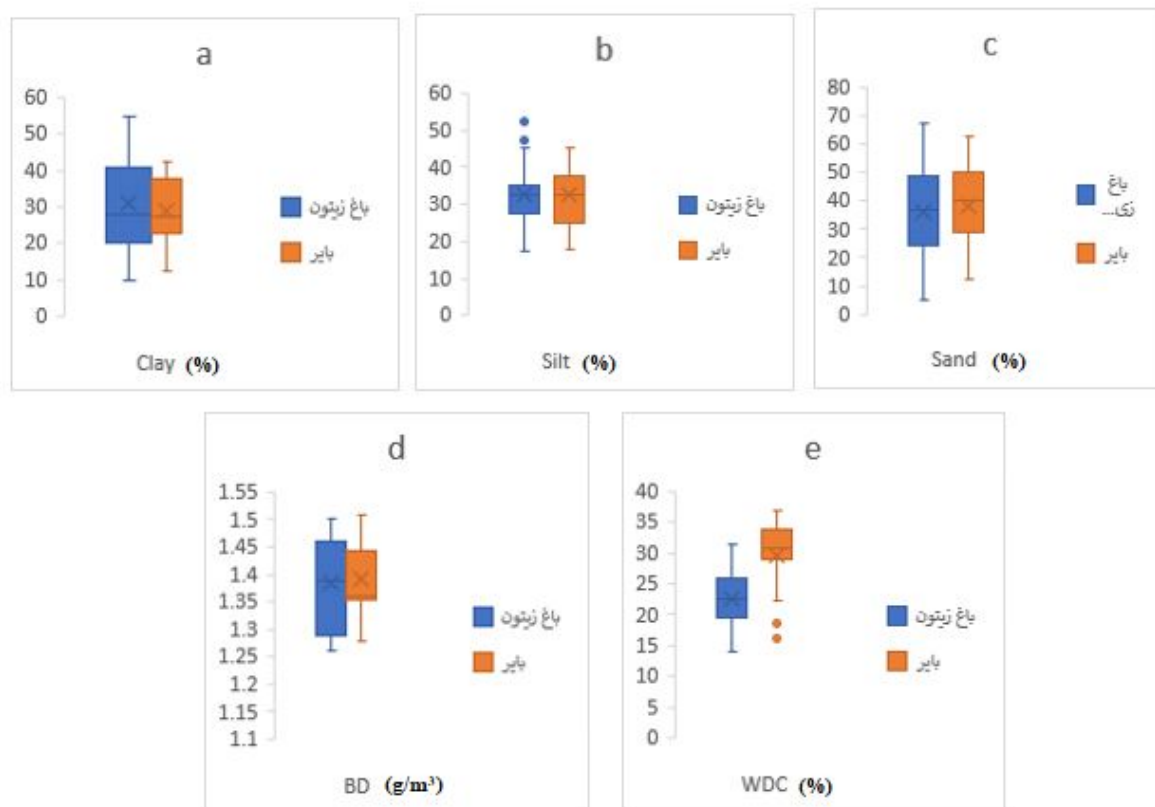
جرم مخصوص ظاهری خاک در دو کاربری باغ زیتون و بایر اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد نشان داد (جدول ۲)، به‌گونه‌ای که مقدار این ویژگی از ۱/۳۵ g/cm<sup>3</sup> در زمین بایر به ۱/۲۸ g/cm<sup>3</sup> در باغ زیتون کاهش یافته و بیانگر کاهش حدود ۱۹/۵ درصدی در اثر تغییر کاربری است. بررسی نمودار جعبه‌ای نیز این اختلاف را تأیید کرد (شکل ۳d)؛ به‌طوری‌که میانگین و میانه جرم مخصوص ظاهری در باغ زیتون به‌طور محسوسی کمتر است و دامنه تغییرات آن نیز نشان‌دهنده تغییرپذیری بیشتر ناشی از مدیریت باغی است. این اختلاف به‌طور مستقیم بیانگر

به خاکورزی مرسوم گزارش نموده‌اند و علت آن را بالا بودن مقدار ماده آلی خاک می‌دانند که اثر تخریب اعمال خاکورزی را خنثی می‌نماید.

### رس قابل‌انتشار در آب

اثر تغییر کاربری بر مقدار رس قابل‌انتشار در آب در سطح احتمال ۰/۰۱ معنی‌دار است (جدول ۲). نتایج نشان داد مقدار رس قابل انتشار در باغ زیتون به‌طور معنی‌داری کمتر از اراضی بایر بوده و در اثر تغییر کاربری از زمین بایر به باغ زیتون به مقدار ۲۵/۱۸ در صد کاهش یافته است (جدول ۲). در شکل (۳e) میانگین و میانه رس قابل انتشار در خاک بایر در سطحی بالاتر قرار گرفته‌اند که بیانگر ناپایداری بیشتر خاک‌دانه‌ها و حساسیت بالاتر خاک بایر به فرسایش است. باغ‌ها و اراضی کشاورزی معمولاً مقدار رس قابل‌انتشار در آب کمتری دارند، زیرا وجود پوشش گیاهی و مدیریت بهتر خاک باعث تثبیت رس می‌شود. کاشت درختان زیتون در صورت همراهی با مدیریت صحیح، می‌تواند تأثیر مثبتی بر پایداری خاک و کاهش پراکندگی رس داشته باشد. در این شرایط، به دلیل کاهش سرعت جریان آب و افزایش فرصت رسوب‌گذاری، ذرات ریز رس تثبیت شده و از شسته شدن آن‌ها جلوگیری می‌شود. همچنین حضور مواد آلی و تشکیل خاکدانه‌های پایدار در این اراضی، از طریق ایجاد پیوندهای فیزیکی و شیمیایی بین ذرات رس، ماده آلی و اکسیدهای فلزی، منجر به کاهش رس قابل انتشار و تقویت ساختار خاک می‌گردد. در مقابل، در اراضی بایر که فاقد پوشش گیاهی و ماده آلی هستند و تحت تأثیر بارندگی بدون حفاظ قرار می‌گیرند، میزان رس قابل انتشار بالاتر بوده و این امر، خطر فرسایش سطحی و کاهش تدریجی مقدار رس را افزایش می‌دهد (Martinez-Mena et al., 2020).

ظاهری می‌شوند. از سوی دیگر، کاهش جرم مخصوص ظاهری در باغ زیتون می‌تواند بخشی از اثر عملیات خاک‌ورزی باشد. مطابق با یافته‌های Tellen و Yerima (۲۰۱۸)، شخم می‌تواند با خرد کردن کلوخه‌ها، افزایش تخلخل و تغییر در حجم توده خاک، جرم مخصوص ظاهری را کاهش دهد. این در حالی است که مقدار جرم مخصوص حقیقی خاک کمتر تحت تأثیر تغییر کاربری قرار می‌گیرد و در نتیجه افزایش تخلخل ناشی از شخم مستقیماً موجب کاهش جرم مخصوص ظاهری می‌شود. افزون بر این، تفاوت بافت خاک نیز می‌تواند این نتایج را توضیح دهد؛ خاک‌های باغ زیتون که دارای درصد رس بالاتری هستند، به‌طور طبیعی حجم بیشتری از منافذ ریز را در خود جای می‌دهند و در نتیجه، نسبت به خاک‌های شنی‌تر کاربری بایر، جرم مخصوص ظاهری کمتری دارند. این نتایج با نتایج Meena و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت دارد که کاهش معنی‌دار وزن مخصوص ظاهری خاک را در اراضی کشاورزی نسبت به اراضی بکر گزارش کردند. در تحقیق‌هایی مشابه به Zhu و همکاران (۲۰۲۴) و Yao و همکاران (2021) به این نتایج دست یافتند که خاک جنگلی با مقدار ماده آلی بیشتر، دارای جرم مخصوص ظاهری کمتری نسبت به سایر کاربری‌ها بود. آن‌ها مقدار کمتر جرم مخصوص ظاهری در سایر کاربری‌های مدیریت شده را به دلیل اختلالاتی که خاکورزی طولانی مدت در خاک ایجاد می‌کند و به خاک آسیب رسانده و سبب ایجاد تراکم در خاک می‌شود اعلام نمودند. Frac و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که اعمال خاکورزی سبب کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک می‌گردد، ولی پس از گذشت زمان مقدار آن به حالت اولیه بازگشته و حتی گاهی بیشتر از مقدار اولیه نیز می‌گردد که علت آن خرد شدن خاک و جایگزین شدن ذرات ریز در منافذ درشت خاک است. نوع و شدت عملیات خاکورزی نیز در مقدار تغییر جرم مخصوص ظاهری خاک مؤثر است. Beare و همکاران (۱۹۹۴) نیز افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک را در روش بدون خاکورزی نسبت



شکل ۴- توزیع کمی برخی خصوصیات فیزیکی در خاک باغ زیتون و اراضی بایر. در باکس پلات‌ها، خط میانه نمایانگر میانه داده‌ها است، لبه‌های باکس نشان‌دهنده چارک اول ( $Q_1$ ) و چارک سوم ( $Q_3$ ) هستند، و خط‌های خارج از باکس حداقل و حداکثر مقادیر را نشان می‌دهند.

**Fig 4.** Quantitative distribution of selected physical properties in olive orchard and barren soils. In the box plots, the line inside the box represents the median, the edges of the box indicate the first ( $Q_1$ ) and third ( $Q_3$ ) quartiles, and the whiskers show the minimum and maximum values.

تجزیه مواد آلی توسط میکروب‌ها مورد استفاده قرار گیرد (Ding et al., 2023). زمین‌های بایر معمولاً دارای کمترین میزان تنفس میکروبی هستند. این به دلیل کمبود مواد آلی، پوشش گیاهی کم و شرایط سخت محیطی است که باعث کاهش فعالیت میکروبی می‌شود (Frąc et al., 2020). در مقابل باغ‌های زیتون به دلیل مدیریت بهتر خاک، افزودن کودهای آلی و معدنی، و وجود پوشش گیاهی پایدار، شرایط مناسبی برای فعالیت میکروبی دارند (Llimós et al., 2021). مطالعات بسیاری نیز در راستای تأیید این نتایج نشان داده‌اند که کاشت محصولات زراعی و باغی و احیای طبیعی می‌توانند فراوانی میکروارگانیسم‌های خاک و در نتیجه مقدار تنفس و بیوماس میکروبی را تغییر دهند. الگوهای کشت خاک و احیای طبیعی منجر به تفاوت‌های قابل توجهی بین فراوانی باکتری‌های هوازی، بی‌هوازی اختیاری و متحمل به تنش می‌شود (Silva-Sánchez et al., 2019).

### ویژگی‌های زیستی خاک تنفس میکروبی

نتایج نشان داد که مقدار تنفس میکروبی در کاربری‌های مختلف با یکدیگر تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۰/۰۱ دارند (۰/۵۴ در باغ زیتون و ۰/۲۸ در کاربری بایر) و تغییر کاربری از زمین بایر به باغ زیتون سبب افزایش ۹۰/۸۱ درصدی مقدار تنفس میکروبی شد (جدول ۳). در شکل (۵a) نیز به وضوح تفاوت بین مقادیر تنفس میکروبی بین دو کاربری قابل مشاهده است و اثر مثبت و قوی تغییر کاربری از بایر به باغ زیتون، بر فعالیت متابولیکی میکروارگانیسم‌ها نشان داده شده است.

تغییر کاربری زمین از بایر با پوشش نیمه‌بیابانی به باغ زیتون می‌تواند تأثیرات مهمی بر تنفس میکروبی خاک داشته باشد. تنفس میکروبی معیاری از فعالیت میکروبی در خاک است و می‌تواند به عنوان شاخصی از سلامت زیستی خاک و توانایی

جدول ۳- مقایسه میانگین ویژگی‌های زیستی خاک در انواع مختلف کاربری

**Table 3. Comparison of the mean biological properties of soil under different land-use types**

نسبت میکروبی Microbial quotient (% درصد)	تنفس میکروبی Microbial respiration (mgCO <sub>2</sub> . g <sup>-1</sup> dm . 24 h <sup>-1</sup> )	کاربری Land-Use
1.93 <sup>a</sup>	0.54 <sup>a</sup>	باغ زیتون Olive Orchard
1.95 <sup>a</sup>	0.28 <sup>b</sup>	بایر Bare
-1.00	+90.81	درصد تغییرات در اثر تغییر کاربری به باغ زیتون Percentage change resulting from land-use conversion to olive orchard

میانگین‌های دارای حروف غیرمشترک در هر ستون، اختلاف معنی‌داری دارند (P < 0.01).

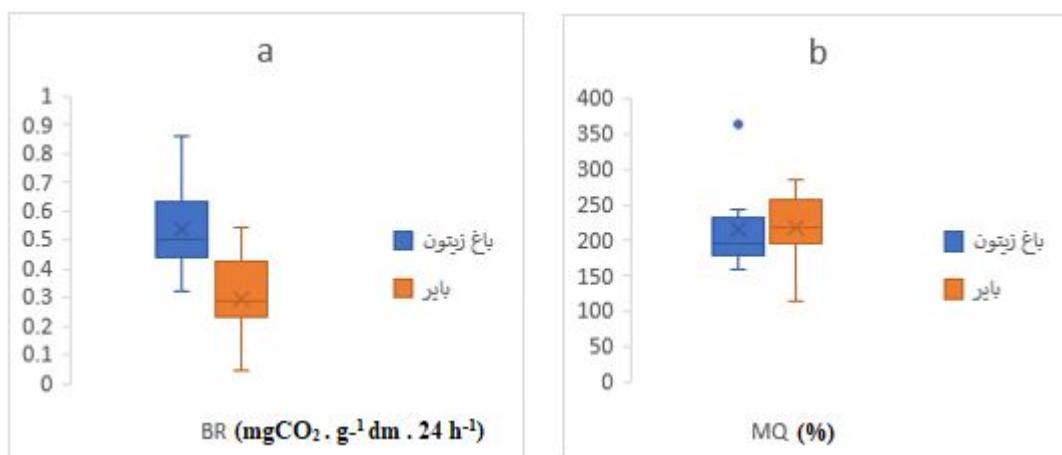
Means with different letters within each column are significantly different (P < 0.01).

### نسبت میکروبی

نتایج مقایسه میانگین بیانگر آن است که مقدار نسبت میکروبی در کاربری‌های بایر و باغ زیتون مشابه است (حدود ۱/۹۳ تا ۱/۹۵) و تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۰/۰۱ بین آن‌ها وجود ندارد (جدول ۳). این نتایج نشان می‌دهد که تغییر کاربری تأثیر عمده‌ای بر نسبت کربن زیست‌توده میکروبی به کربن آلی کل خاک ندارد. نتایج ارائه شده در شکل (۵b) نیز این نتایج را تأیید نموده و مشاهده می‌شود مقدار نسبت میکروبی بین دو کاربری بایر و باغ زیتون اختلاف کمی دارد و هم‌پوشانی شدید آن بیانگر پایداری این شاخص و حساسیت کم آن به تغییر کاربری کوتاه‌مدت یا میان‌مدت است.

نسبت میکروبی، معمولاً به عنوان نسبتی بین میکروبیوم خاک (میکروب‌های فعال) و مقدار کربن آلی خاک تعریف می‌شود. این نسبت نشان می‌دهد که چه بخشی از مواد آلی خاک تحت تأثیر فرآیندهای زیستی، به‌خصوص توسط میکروب‌ها، در حال مصرف یا نگهداری است (Yan et al., 2022). به‌طور کلی، نسبت میکروبی برای مقایسه سلامت زیستی و سطح فعالیت میکروبی بین انواع مختلف کاربری زمین به کار می‌رود (Mganga et al., 2024). عدم وجود تغییرات چشمگیر در مقدار نسبت میکروبی در دو کاربری (باغ زیتون و زمین بایر) به معنی فعالیت میکروبی مشابه نسبت بیوماس میکروبی به کربن آلی خاک است. این بدین معناست که باوجود تفاوت‌های

احتمالی در خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، میکروب‌های خاک در هر دو نوع کاربری به یک‌میزان از کربن آلی خاک برای فعالیت زیستی خود استفاده می‌کنند و توده میکروبی در خاک کاربری‌های متفاوت، نسبت ثابتی از کربن آلی است. به‌عبارت‌دیگر پایداری نسبت میکروبی نشان‌دهنده این است که سهم میکروارگانیسم‌ها در چرخه کربن، حتی با تغییرات در نوع کاربری زمین، تغییرات زیادی را تجربه نمی‌کند. از دلایل احتمالی این مسئله می‌توان به اقلیم و شرایط محیطی مانند دما و رطوبت اشاره کرد که تأثیر قابل‌توجهی بر فعالیت میکروبی دارند. از آنجاییکه این کاربری‌ها در ناحیه‌ای با شرایط آب و هوایی یکسان واقع شده‌اند، اقلیم و شرایط محیطی یکسان می‌تواند فعالیت میکروبی را در هر دو کاربری مشابه نگاه دارد. علاوه بر این، ساختار فیزیکی خاک، مانند میزان تهویه و رطوبت، بر فعالیت میکروبی تأثیر می‌گذارد و از آنجاکه ساختار خاک بین این دو کاربری تفاوت قابل‌توجهی ندارد، می‌تواند عاملی برای برابری نسبت میکروبی باشد. مطالعات متعددی نیز در راستای تأیید این نتیجه مشاهده شده است. مثلاً Yan و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی اثر تغییر کاربری زمین بر زیست‌توده میکروبی و نسبت میکروبی خاک در شمال چین پرداختند. نتایج نشان داد نسبت میکروبی در اراضی کشاورزی رها شده با زمین‌های زراعی تفاوت قابل‌توجهی نداشت و مقدار آن در کاربری‌های مختلف نسبتاً پایدار بود.



شکل ۵- توزیع کمی برخی خصوصیات زیستی در خاک باغ زیتون و اراضی. در باکس‌پلات‌ها، خط میانه نمایانگر میانه داده‌ها است، لبه‌های باکس نشان‌دهنده چارک اول (Q<sub>1</sub>) و چارک سوم (Q<sub>3</sub>) هستند، و خط‌های خارج از باکس حداقل و حداکثر مقادیر را نشان می‌دهند

**Fig 5. Quantitative distribution of selected biological properties in olive orchard and barren soils. In the box plots, the line inside the box represents the median, the edges of the box indicate the first (Q<sub>1</sub>) and third (Q<sub>3</sub>) quartiles, and the whiskers show the minimum and maximum values**

کوددهی از ضرورت‌های مدیریتی این کاربری به شمار می‌روند. در مجموع، نتایج نشان داد که تغییر کاربری از اراضی بایر به باغ زیتون می‌تواند در کوتاه‌مدت به بهبود برخی شاخص‌های کیفیت خاک منجر شود، اما دوام و پایداری این بهبودها کاملاً به نحوه مدیریت بستگی دارد. برای ارزیابی دقیق‌تر پیامدهای بلندمدت، مطالعات آینده باید به‌طور صریح اثرات مدیریت را از اثرات خود تغییر کاربری تفکیک کرده و پیامدهای اکولوژیک از جمله روند شوری، پویایی مواد آلی، تنوع زیستی خاک و امنیت آبی را در بازه‌های زمانی طولانی‌تر بررسی نمایند. با چنین رویکردی می‌توان درباره تداوم یا عدم تداوم بهبودهای مشاهده شده اظهار نظر علمی و معتبر ارائه کرد.

### تعارض منافع

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

### مشارکت نویسندگان

تمامی نویسندگان به‌طور برابر در مفهوم‌پردازی پژوهش و نگارش پیش‌نویس اولیه و نسخه‌های بازنگری‌شده مقاله مشارکت داشته‌اند.

Conceptualization, K.M., MN.N and A.G.; Methodology, K.M, MN.N., A.G., J.S.; software, S.H.; validation, S.H., M.S.A., J.S and K.M.; Formal Analysis, S.H.; Investigation, S.H.; Resources, S.H.; Data Curation, A.G., M.N; Writing—Original Draft Preparation, S.H.; Writing—Review and Editing, S.H., K.M, M.N, A.G., J.S; Visualization, S.H.; Supervision, K.M.; Project Administration, A.G.

### نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که تبدیل اراضی بایر به باغ زیتون در منطقه لوشان با تغییرات قابل توجهی در ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک همراه بود. بخش عمده افزایش عناصر غذایی (نظیر کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر قابل جذب، پتاسیم، کلسیم و منیزیم)، بهبود ظرفیت تبادل کاتیونی و کاهش جرم مخصوص ظاهری را می‌توان به مداخلات مدیریتی رایج در باغ‌ها به‌ویژه کوددهی، آبیاری منظم و اختلاط مکانیکی خاک نسبت داد. این موضوع نشان می‌دهد که بهبودهای ثبت شده در واقع محصول تعامل بین تغییر کاربری و شدت مدیریت بوده و الزاماً نمی‌توان آن‌ها را به‌عنوان ویژگی ذاتی کشت زیتون تفسیر کرد.

در سطح فیزیکی و زیستی، کاهش رس قابل انتشار و افزایش تنفس میکروبی حاکی از ارتقای نسبی پایداری خاکدانه‌ها و افزایش فعالیت زیستی در کاربری باغ زیتون است. با این حال، این شاخص‌ها نیز تا حد زیادی از رژیم کوددهی، کیفیت و مقدار آب آبیاری و میزان مواد آلی ورودی تأثیر می‌پذیرند.

در مقابل این تغییرات مطلوب، افزایش معنی‌دار هدایت الکتریکی در خاک باغ‌های زیتون، یک پیامد اکولوژیک بالقوه نگران‌کننده است که می‌تواند در بلندمدت به کاهش نفوذپذیری، تخریب ساختار خاک، اختلال در تبادل کاتیونی و کاهش کارایی عناصر غذایی منجر شود. روند افزایشی شوری که در این مطالعه مشاهده شد، نشان می‌دهد که سیستم مورد بررسی ممکن است در مسیر پس‌روی کیفی قرار گیرد؛ از اینرو، هرگونه ارزیابی مثبت درباره پایداری چنین سامانه‌ای باید با احتیاط جدی همراه باشد. پایش مستمر شوری، کنترل کیفیت آب آبیاری و اصلاح برنامه

## References

- Adiyah, F., Michéli, E., Csorba, A., Weldmichael, T. G., Gyuricza, C., Ocansey, C. M., ... & Fuchs, M. (2022). Effects of landuse change and topography on the quantity and distribution of soil organic carbon stocks on Acrisol catenas in tropical small-scale shade cocoa systems of the Ashanti region of Ghana. *Catena*, 216, 106366. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106366>
- Anderson, J. P. (1982). Soil respiration. *Methods of soil analysis: part 2 chemical and microbiological properties*, 9, 831-871. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2e.d.c41>
- Beare, M. H., Hendrix, P. F., & Coleman, D. C. (1994). Water-stable aggregates and organic matter fractions in conventional-and no-tillage soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58(3), 777-786. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800030020x>
- Beheshti, A. A. A., Raiesi, F., & GOLCHIN, A. (2011). The effects of soil disturbance due to land use change of forest lands to cultivated lands on biological soil quality indices of forest ecosystems of Northern Iran. *SID*. <https://sid.ir/paper/211228/en>
- Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). Bulk density. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods*, 5, 363-375.
- Bower, C. A., Reitemeier, R. F., & Fireman, M. (1952). Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. *Soil science*, 73(4), 251-262.
- Buraka, T., Elias, E., & Lelago, A. (2022). Soil organic carbon and its' stock potential in different land-use types along slope position in Coka watershed, Southern Ethiopia. *Heliyon*, 8(8). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10261>
- Chen, S., Zhang, G., Zhu, P., Wang, C., & Wan, Y. (2023). Impact of land use type on soil erodibility in a small watershed of rolling hill northeast China. *Soil and Tillage Research*, 227, 105597. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105597>
- Cotrufo, M. F., Haddix, M. L., Kroeger, M. E., & Stewart, C. E. (2022). The role of plant input physical-chemical properties, and microbial and soil chemical diversity on the formation of particulate and mineral-associated organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 168, 108648. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108648>
- de Pierri Castilho, S. C., Cooper, M., Dominguez, A., & Bedano, J. C. (2016). Effect of land use changes in eastern amazonia on soil chemical, physical, and biological attributes. *Soil Science*, 181(3/4), 133-147. DOI: [10.1097/SS.000000000000152](https://doi.org/10.1097/SS.000000000000152)
- De Rosa, D., Ballabio, C., Lugato, E., Fasiolo, M., Jones, A., & Panagos, P. (2024). Soil organic carbon stocks in European croplands and grasslands: How much have we lost in the past decade?. *Global Change Biology*, 30(1), e16992. <https://doi.org/10.1111/gcb.16992>
- Ding, J. N. (2023). Effect Of Cultivation and Natural Restoration On Soil Microbial Functional Structure In Coldregion Wetlands. *Applied Ecology & Environmental Research*, 21(2). 10.15666. DOI: [http://dx.doi.org/10.15666/aeer/2102\\_1471\\_1484](http://dx.doi.org/10.15666/aeer/2102_1471_1484)
- Ebrahimi, M., S. Kashani & A. Moghadam, 2016. Effect of range land change to Aggricultural on soil productivity. *Water and Soil journal*, 1(26): 31-44 (in Persian).
- Estefan, G., Sommer, R., & Ryan, J. (2013). *Methods of soil, plant, and water analysis: a manual for the West Asia and North Africa region*. <https://hdl.handle.net/20.500.11766/7512>
- Eze, S., Magilton, M., Magnone, D., Varga, S., Gould, I., Mercer, T. G., & Goddard, M. R. (2023). Meta-analysis of global soil data identifies robust indicators for short-term changes in soil organic carbon stock following land use change. *Science of the Total Environment*, 860, 160484. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160484>
- Ferreira, A. C. C., Leite, L. F. C., de Araújo, A. S. F., & Eisenhauer, N. (2016). Land-use type effects on soil organic carbon and microbial properties in a semi-arid region of northeast Brazil. *Land Degradation & Development*, 27(2), 171-178. <https://doi.org/10.1002/ldr.2282>
- Frąc, M., Lipiec, J., Usowicz, B., Oszust, K., & Brzezińska, M. (2020). Structural and functional microbial diversity of sandy soil under cropland and grassland. *PeerJ*, 8, e9501. <https://doi.org/10.7717/peerj.9501>
- Gee, G.W. and Bauder J.M. (1986). Partical-size analysis. In *Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods*. Agronomy Monograph No. 9 (2nd

- edition), American Society of Agronomy, Madison, WI. Pp 383-411. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15>
19. Geremew, B., Tadesse, T., Bedadi, B., Gollany, H. T., Tesfaye, K., & Aschalew, A. (2023). Impact of land use/cover change and slope gradient on soil organic carbon stock in Anjeni watershed, Northwest Ethiopia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(8), 971. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11537-7>
  20. Guibert, H., Fallavier, P., & Roméro, J. J. (1999). Carbon content in soil particle size and consequence on cation exchange capacity of alfisols. *Communications in soil science and plant analysis*, 30(17-18), 2521-2537. <https://doi.org/10.1080/00103629909370392>
  21. Hemmati, S., Moravej, K., Golchin, A. and Askari, M. S. (2025). Assessment of the Impact of Land Use Change on Soil Physical, Chemical, and Biological Properties: A Case Study in the Loshan Region, Gilan Province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, (), -. doi: 10.22059/ijswr.2025.395186.669938. (In Persian). [10.22059/ijswr.2025.395186.669938](https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.395186.669938)
  22. Hesse P.R. 1971. A text book of soil chemical analysis. John Murray. London. <https://doi.org/10.1201/9780203739433>
  23. Hydari, N., Mousavi, S. B., Beheshti Agha, A., Rakhsh, F., & Karimi, I. (2022). The effect of land use change on some physical, chemical and biological characteristics of soil. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(7), 1625-164. (In Persian). [10.22059/ijswr.2022.344871.669298](https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.344871.669298)
  24. Javadi S, Zehtabian G, Khosravi H, Abolhasani A.(2020) Assessing the impact of land use change on Soil physical and chemical characteristics (Case study: Eshtehard, Alborz province).220-208:(2) 14. (In Persian). [20.1001.1.20080891.1399.14.2.4.4](https://doi.org/10.1001.1.20080891.1399.14.2.4.4)
  25. Joshi, R. K., & Garkoti, S. C. (2023). Influence of vegetation types on soil physical and chemical properties, microbial biomass and stoichiometry in the central Himalaya. *Catena*, 222, 106835. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106835>
  26. Knudsen D., Peterson G.A. and Pratt P.F. (1982). Lithium, sodium and potassium. p. 225-246. In: A.L. Page (ed) *Methods of Soil Analysis*. Part 2. America Society of Agronomy. Madison, WI. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c13>
  27. Kooch, Y., Ghorbanzadeh, N., Kuzyakov, Y., Praeg, N., & Ghaderi, E. (2022). Investigation of the effects of the conversion of forests and rangeland to cropland on fertility and soil functions in mountainous semi-arid landscape. *Catena*, 210, 105951. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105951>
  28. Krogh, L., Breuning-Madsen, H., & Greve, M. H. (2000). Cation-exchange capacity pedotransfer functions for Danish soils. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Plant Soil Science*, 50(1), 1-12. <https://doi.org/10.1080/090647100750014358>
  29. Leul, Y., Assen, M., Damene, S., & Legass, A. (2023). Effects of land use types on soil quality dynamics in a tropical sub-humid ecosystem, western Ethiopia. *Ecological Indicators*, 147, 110024. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110024>
  30. Levy, G. J., Dag, A., Raviv, M., Zipori, I., Medina, S., Saadi, I., ... & Laor, Y. (2018). Annual spreading of olive mill wastewater over consecutive years: Effects on cultivated soils' physical properties. *Land Degradation & Development*, 29(1), 176-187. <https://doi.org/10.1002/ldr.2861>
  31. Li, C., Wang, H., Zhao, L., & Shen, H. (2024). Effect of long-term land use change on soil organic carbon fractions and functional groups. *Arid Land Research and Management*, 38(2), 182-200. <https://doi.org/10.1080/15324982.2023.2284882>
  32. Li, H., Zhu, H., Liang, C., Wei, X., & Yao, Y. (2022). Soil erosion significantly decreases aggregate-associated OC and N in agricultural soils of Northeast China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 323, 107677. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107677>
  33. Llimós, M., Segarra, G., Sancho-Adamson, M., Trillas, M. I., & Romanyà, J. (2021). Impact of olive saplings and organic amendments on soil microbial communities and effects of mineral fertilization. *Frontiers in Microbiology*, 12, 653027. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.653027>
  34. Martínez-Mena, M., Carrillo-López, E., Boix-Fayos, C., Almagro, M., Franco, N. G., Díaz-Pereira, E., ... & De Vente, J. (2020). Long-term effectiveness of sustainable land management practices to control runoff, soil erosion, and nutrient loss

- and the role of rainfall intensity in Mediterranean rainfed agroecosystems. *Catena*, 187, 104352. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104352>
35. McGrath, D. A., Smith, C. K., Gholz, H. L., & Oliveira, F. D. A. (2001). Effects of land-use change on soil nutrient dynamics in Amazonia. *Ecosystems*, 4, 625-645. <https://doi.org/10.1007/s10021-001-0033-0>
36. Meena, V. S., Mondal, T., Pandey, B. M., Mukherjee, A., Yadav, R. P., Choudhary, M., ... & Pattanayak, A. (2018). Land use changes: Strategies to improve soil carbon and nitrogen storage pattern in the mid-Himalaya ecosystem, India. *Geoderma*, 321, 69-78. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.02.002>
37. Mganga, K. Z., Rolando, J., Kalu, S., & Karhu, K. (2024). Microbial soil quality indicators depending on land use and soil type in a semi-arid dryland in Kenya. *European Journal of Soil Biology*, 121, 103626. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2024.103626>
38. Miju, C., Kiflu, A., & Gizachew, S. (2025). Effects of land use/land cover change on soil physicochemical properties and soil carbon stock in Kochore district, southern Ethiopia. *Arabian Journal of Geosciences*, 18(2), 41. <https://doi.org/10.1007/s12517-025-12181-w>
39. Nanganoa, L. T., Okolle, J. N., Missi, V., Tueche, J. R., Levai, L. D., & Njukeng, J. N. (2019). Impact of Different Land-Use Systems on Soil Physicochemical Properties and Macrofauna Abundance in the Humid Tropics of Cameroon. *Applied and Environmental Soil Science*, 2019(1), 5701278. <https://doi.org/10.1155/2019/5701278>
40. Olsen S.R., Cole C.V., Watanabe F.S. and Dean L.A. (1954). Estimation of Available Phosphorous in Soils by Extraction with Sodium Bicarbonate; U.S. Department of Agriculture: Washington, D.C., USDA Circ. 939.
41. Page A.L., Miller R.H., and Keeney D.R. (1982). *Methods of Soil Analysis*, part 2, chemical and microbiological properties. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America, Madison, WI. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c33>
42. Poeplau, C., & Don, A. (2013). Sensitivity of soil organic carbon stocks and fractions to different land-use changes across Europe. *Geoderma*, 192, 189-201. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.08.003>
43. Ramos, T. V., Santos, L. A. C., de Souza, W. G., de Souza, K. R., Lima, N. L., Guimaraes, L. E., ... & de Melo e Silva-Neto, C. (2018). Chemical attributes of Brazilian Cerrado soil under different management systems. *Australian Journal of Crop Science*, 12(3), 505-510. <https://search.informit.org/doi/10.3316/info.rmit.608172939903110>
44. Samie, F., Yaghmaeian Mahabadi, N., Abrishamkesh, S. and Maslahatjou, A. (2022). Impact of land use change on erodibility and soil quality indicators (case study: Sidasht, Guilan Province). *Agricultural Engineering*, 45(1), 57-78. (In Persian). <https://doi.org/10.22055/agen.2022.39858.1630>
45. Silva-Sánchez, A., Soares, M., & Rousk, J. (2019). Testing the dependence of microbial growth and carbon use efficiency on nitrogen availability, pH, and organic matter quality. *Soil Biology and Biochemistry*, 134, 25-35. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.03.008>
46. Soil Survey Staff. 1996. *Soil Survey Laboratory Methods Manual*. Soil Survey Investigations Report No. 42.
47. Solly, E. F., Weber, V., Zimmermann, S., Walthert, L., Hagedorn, F., & Schmidt, M. W. (2020). A critical evaluation of the relationship between the effective cation exchange capacity and soil organic carbon content in Swiss forest soils. *Frontiers in Forests and Global Change*, 3, 98. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00098>
48. Sun, C., Liu, G., & Xue, S. (2016). Land-use conversion changes the multifractal features of particle-size distribution on the Loess Plateau of China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(8), 785. <https://doi.org/10.3390/ijerph13080785>
49. Taghipour, M., Yaghmaeian Mahabadi, N. and Shabanpour, M. (2023). Assessment of soil quality indices using multivariate analysis in different land uses (case study: Tootkabon, Guilan province). *Agricultural Engineering*, 46(3), 251-271. <https://doi.org/10.22055/agen.2023.44957.1684>
50. Tellen, V. A., & Yerima, B. P. (2018). Effects of land use change on soil physicochemical properties in selected areas in the North West region of Cameroon. *Environmental systems*

- research, 7(1), 1-29.  
<https://doi.org/10.1186/s40068-018-0106-0>
51. Torres, J. L. R., Costa, D. D. D. A., Silveira, B. D. S., Vieira, D. M. D. S., & Lemes, E. M. (2020). Soil physical attributes in long-term soil management systems (Tillage and No-till). *Journal of Agricultural Science*, 12(4), 194.  
<https://doi.org/10.3390/agronomy13040966>
  52. Wang, B., Waters, C., Orgill, S., Gray, J., Cowie, A., Clark, A. and Li Liu, D., 2018. High resolution mapping of soil organic carbon stocks using remote sensing variables in the semi-arid rangelands of eastern Australia. *Science of the Total Environment*, 630, pp.367-378.  
[DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.02.204](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.204)
  53. Walkley A. and Black I.A. (1934). An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37: 29-37.
  54. Xia, S., Song, Z., Yu, B., Fan, Y., Tony, V., Guo, L., ... & Wang, H. (2024). Land use changes and edaphic properties control contents and isotopic compositions of soil organic carbon and nitrogen in wetlands. *Catena*, 241, 108031.  
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108031>
  55. Yan, Y., Wang, C., Zhang, J., Sun, Y., Xu, X., Zhu, N., ... & Chen, J. (2022). Response of soil microbial biomass C, N, and P and microbial quotient to agriculture and agricultural abandonment in a meadow steppe of northeast China. *Soil and Tillage Research*, 223, 105475.  
<https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105475>
  56. Yao, M., Shao, D., Lv, C., An, R., Gu, W., & Zhou, C. (2021). Evaluation of arable land suitability based on the suitability function-A case study of the Qinghai-Tibet Plateau. *Science of The Total Environment*, 787, 147414.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147414>
  57. Yuan, J., Yao, Y., Guan, Y., Sadiq, M., Li, J., Liu, S., ... & Yan, L. (2024). Effects of land use patterns on soil properties and nitrous oxide flux on a semi-arid environmental conditions of Loess Plateau China. *Global Ecology and Conservation*, 51, e02899.  
<https://doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e02899>
  58. Yuefeng, G., Fucang, Q., Yunfeng, Y. A. O., & Wei, Q. I. (2014). Effects of land use changes on soil organic carbon and soil microbial biomass carbon in low hills of North Yanshan Mountains. *Range Management and Agroforestry*, 35(1), 15-21.
  59. Zhang, W., Xu, Y., Gao, D., Wang, X., Liu, W., Deng, J., ... & Ren, G. (2019). Ecoenzymatic stoichiometry and nutrient dynamics along a revegetation chronosequence in the soils of abandoned land and Robinia pseudoacacia plantation on the Loess Plateau, China. *Soil Biology and Biochemistry*, 134, 1-14.  
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.03.017>
  60. Zhu, Z., Chen, J., Hu, H., Zhou, M., Zhu, Y., Wu, C., ... & Wang, J. (2024). Soil quality evaluation of different land use modes in small watersheds in the hilly region of southern Jiangsu. *Ecological Indicators*, 160, 111895.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111895>

**Contents**  
**Subject**

**Assessment of Soils Salinity Status in Pomegranate Orchards of Saveh ..... 247**

**Mohammad Ali Khodshenas, and Javad Ghabbeyklou**

**Dynamics and Distribution of Different Forms of Phosphorus and Potassium in the Rhizosphere of Maize and Potato under Drip Fertigation .....263**

**Meisam Rezaei, Mostafa Marzi, Kambiz Bazargan, Karim Shahbazi, and Meysam Cheraghi**

**Soil Potassium Dynamics and Its Relationship with Clay Mineralogy in Agricultural Soils of the Shahrekord Piedmont Plain .....287**

**Marzieh Barati Zanyani, Alireza Hossienpur, Mohammad Hasan Salehi, and Azam Jafari**

**The Effect of Moisture on the Sulfur Oxidation and Some Chemical Properties of Saline and Non-Saline Soils.....303**

**Jalal Ghaderi, Mohammad Hossein Davoodi, Neda Mohammadi, and Kamal Khalkhal**

**Physiological and Nutritional Responses of *Citrus unshiu* cv. Miyagawa on Sour Orange (*Citrus aurantium* L.) in Mazandran Calcareous Soils of Mazandaran province.....321**

**Ali Asadi kangarshahi, and Negin Akhlaghi Amiri**

**Chemical and Structural Properties of Humic Acid Extracted from Leonardites of Selected Mines in Kerman .....345**

**Razieh Ahesteh, Majid Hejazi Mehrizia, Naser Boroomand, Mehdi Sarcheshmeh Pour, and Majid Fekri**

**Assessing the Effects of Converting Barren Land to Olive Orchards on Soil Physical, Chemical, and Biological Properties: A Case Study in Guilan Province.....361**

**Samira Hemmati, Kamran Moravej, Mir Naser Navidi, Ahmad Golchin, and Javad Seyedmohammadi**

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. 39, No.3  
2025**

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

**English Editor:** Hamid Siadat, PhD  
**Technical Editor:** Eng. 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 39\ No.3\ 2025

ISSN: 2228 -7124

## Contents Subject

- Assessment of Soils Salinity Status in Pomegranate Orchards of Saveh ..... 247**  
Mohammad Ali Khodshenas, and Javad Ghabbeyklou
- Dynamics and Distribution of Different Forms of Phosphorus and Potassium in the Rhizosphere of Maize and Potato under Drip Fertigation .....263**  
Meisam Rezaei, Mostafa Marzi, Kambiz Bazargan, Karim Shahbazi, and Meysam Cheraghi
- Soil Potassium Dynamics and Its Relationship with Clay Mineralogy in Agricultural Soils of the Shahrekord Piedmont Plain .....287**  
Marzieh Barati Zanyani, Alireza Hossienpur, Mohammad Hasan Salehi, and Azam Jafari
- The Effect of Moisture on the Sulfur Oxidation and Some Chemical Properties of Saline and Non-Saline Soils.....303**  
Jalal Ghaderi, Mohammad Hossein Davoodi, Neda Mohammadi, and Kamal Khalkhal
- Physiological and Nutritional Responses of *Citrus unshiu* cv. Miyagawa on Sour Orange (*Citrus aurantium* L.) in Mazandran Calcareous Soils of Mazandaran province.....321**  
Ali Asadi kangarshahi, and Negin Akhlaghi Amiri
- Chemical and Structural Properties of Humic Acid Extracted from Leonardites of Selected Mines in Kerman .....345**  
Razieh Ahesteh, Majid Hejazi Mehrizia, Naser Boroomand, Mehdi Sarcheshmeh Pour, and Majid Fekri
- Assessing the Effects of Converting Barren Land to Olive Orchards on Soil Physical, Chemical, and Biological Properties: A Case Study in Guilan Province.....361**  
Samira Hemmati, Kamran Moravej, Mir Naser Navidi, Ahmad Golchin, and Javad Seyedmohammadi