



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 ۲ سال ۱۴۰۴

فهرست مقالات

مقایسه اثرات کودهای شیمیایی، زیستی و آلی بر رشد و تولید اسانس گل بابونه آلمانی (*Matricaria chamomilla* L.)..... ۱۵۳
علی اصغر ذوالفقاری، آرزو دخت عبدیان، محمدرضا یزدانی، داود کرتولی نژاد و الهه نیکویی

پایش تغییرات سلامت پوشش گیاهی اراضی کشاورزی با استفاده از داده‌های سنجش از دور در استان البرز..... ۱۷۱
رسول خوارزمی و میرناصر نویدی

شیمی سنجی عناصر بالقوه سمی در خاک سطحی کلان‌شهر همدان..... ۱۸۹
نیره‌سادات حسینی و سهیل سبحان اردکانی

ارزیابی برخی ویژگی‌های خاک باغ‌های سیب با استفاده از رویکرد شاخص ارزش غذایی (NIV)..... ۲۰۵
عزیز مجیدی

بررسی تأثیر کاربرد ژئولیت و کود نانو بر عملکرد و خصوصیات آنتی اکسیدانی اسانس نعناع فلفلی تحت رژیم‌های مختلف کم
آبی..... ۲۲۱
الناز فرج‌زاده معماری تبریزی

بررسی تأثیر تغییر کاربری بر کیفیت خاک با استفاده از شاخص‌های تلفیقی و تحلیل داده‌های جامع و حداقلی..... ۲۴۶

سمیرا همتی، کامران مروج، میرناصر نویدی، احمد گلچین و محمدصادق عسکری

وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

انجمن علوم خاک ایران

مؤسسه تحقیقات خاک و آب

نشریه
پژوهش‌های خاک

جلد ۳۹ شماره (۲)

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

دکتر هادی اسدی رحمانی

مدیر مسئول:

استاد مؤسسه تحقیقات خاک و آب

دکتر کریم شهبازی

سر دبیر:

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:

بن نشریه در پایگاه‌های علمی زیر نمایه می‌شود:

www.srjournal.areeo.ir :

پایگاه الکترونیکی نشریه پژوهش‌های خاک

www.isc.gov.ir

ایگاه استادی علوم جهان اسلام (ISC):

www.swri.ir

پایگاه الکترونیکی مؤسسه تحقیقات خاک و آب:

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

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

www.sid.ir

ایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی:

majalehsoil@yahoo.com

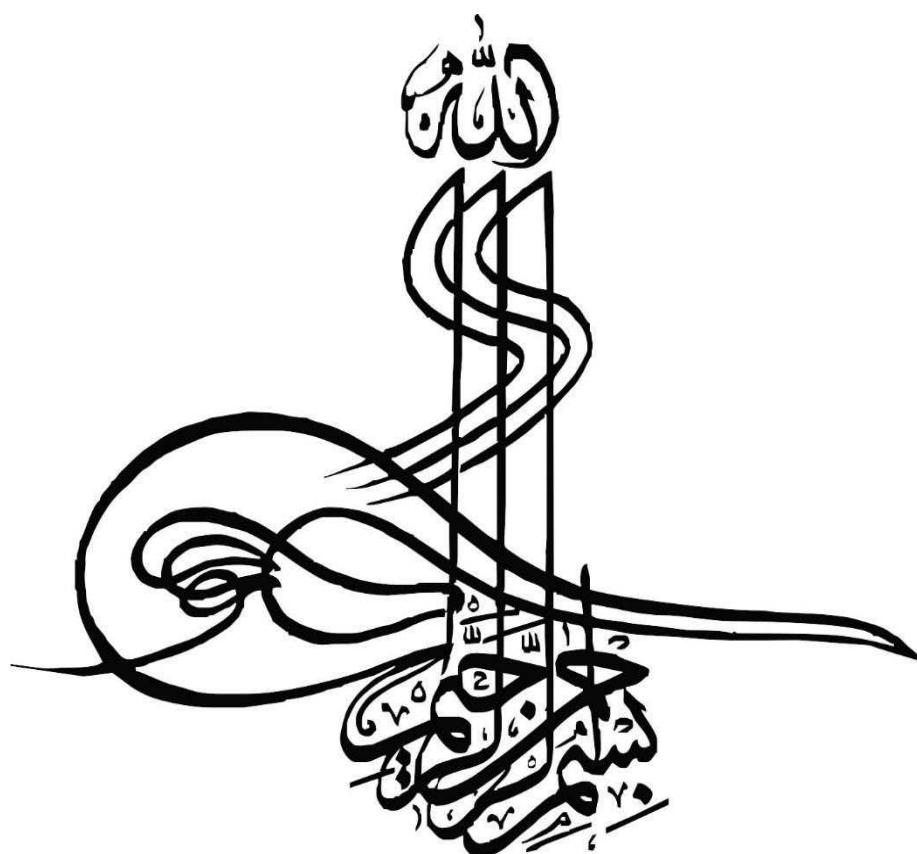
آدرس الکترونیکی دفتر مجله:

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 نمابر: ۳۶۲۰۸۷۹۶ (۰۲۶)



فهرست مقالات

- مقایسه اثرات کودهای شیمیایی، زیستی و آلی بر رشد و تولید اسانس گل بابونه آلمانی (*Matricaria chamomilla* L.)..... ۱۵۳
علی اصغر ذوالفقاری، آرزو دخت عبدیان، محمدرضا یزدانی، داود کرتولی نژاد و الهه نیکویی
- پایش تغییرات سلامت پوشش گیاهی اراضی کشاورزی با استفاده از داده‌های سنجنش از دور در استان البرز..... ۱۷۱
رسول خوارزمی و میرناصر نویدی
- شیمی‌سنجی عناصر بالقوه سمی در خاک سطحی کلان‌شهر همدان..... ۱۸۹
نیره‌سادات حسینی و سهیل سبحان اردکانی
- ارزیابی برخی ویژگی‌های خاک باغ‌های سیب با استفاده از رویکرد شاخص ارزش غذایی (NIV)..... ۲۰۵
عزیز مجیدی
- بررسی تأثیر کاربرد زئولیت و کود نانو بر عملکرد و خصوصیات آنتی اکسیدانی اسانس نعناع فلفلی در تیمارهای مختلف کم-آبی..... ۲۲۱
الناز فرج‌زاده معماری تبریزی
- بررسی تأثیر تغییر کاربری بر کیفیت خاک با استفاده از شاخص‌های تلفیقی و تحلیل داده‌های جامع و حداقلی ۲۴۶
سمیرا همتی، کامران مروج، میرناصر نویدی، احمد گلچین و محمدصادق عسکری

راهنمای تهیه مقاله برای انتشار در نشریه علمی پژوهش‌های خاک

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

الف) اصول کلی

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

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

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

۴- مقاله نباید در هیچ یک از نشریات کشور به چاپ رسیده یا همزمان برای مجلات دیگر ارسال شده باشد این مسئله باید با تأیید کتبی نویسنده مسئول باشد.

- مقالاتی که مبنی بر آزمایش‌هایی است که بیش از ۳ سال از خاتمه اجرای آن گذشته است از شانس کمتری برای پذیرش برخوردار خواهد بود و نویسندگان باید علت تأخیر در نوشتن مقاله را توجیه کنند

ب) نحوه تهیه و ارسال مقاله

نحوه نگارش مقاله

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

ستونی در نرم افزار Word 2007 تایپ شود.

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

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

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

جدول ۱- نوع قلم و اندازه		
موقعیت استفاده	نام قلم	اندازه قلم
عنوان مقاله	Nazanin پر رنگ	14
متن مقاله	Nazanin	12
عناوین بخش‌های مقاله	Nazanin پر رنگ	12
نام مؤلفان	Nazanin پر رنگ	12
کلمه چکیده و کلمات کلیدی	Nazanin پر رنگ	12
عناوین جداول و اشکال	Nazanin پر رنگ	11
متن جداول و شکل‌ها و منابع	Nazanin	11
اعداد جداول	Times New Roman	یک واحد کمتر از اندازه فارسی در هر موقعیت
متن انگلیسی	Times New Roman	یک واحد کمتر از اندازه فارسی در هر موقعیت

نویسنده(گان) موظف هستند حداکثر ۱۵ روز پس از دریافت نظرات داوران اصلاحات لازم و یا پاسخ را ارسال نمایند. ضمناً ارسال چکیده لاتین مقاله به همراه مقاله الزامی است. ارسال نامه درخواست چاپ مقاله در نشریه پژوهش‌های خاک به همراه فرم تعهد نامه الزامی است. کلیه مقالات پس از دریافت اعلام وصول گردیده و جهت ارزیابی برای داوران مجله ارسال خواهد شد و پس از اتخاذ رأی داوران و تأیید هیئت تحریریه، مقاله در نوبت چاپ قرار خواهد گرفت

شناسنامه مقاله

مقالات باید شامل عنوان، چکیده فارسی و انگلیسی (حداکثر تا ۳۰۰ کلمه)، واژه‌های کلیدی (Keywords)، مقدمه، مواد و روش‌ها، نتایج، بحث و نتیجه‌گیری، تشکر و قدردانی (در صورت نیاز) و فهرست منابع باشد.

برگ شناسه

عنوان مقاله، نام، نام خانوادگی، موقعیت شغلی نگارنده(گان)، نام دانشگاه یا مؤسسه پژوهشی که نگارنده(گان) در آن اشتغال دارند، نشانی کامل نگارنده(گان) و نام و مشخصات نگارنده مسئول مکاتبات (به هر دو زبان فارسی و انگلیسی) و پست الکترونیکی همه نویسندگان در صفحه چکیده ها تایپ و در قسمت فایل‌های با نام نویسنده (گان) بارگذاری نمایید و در قسمت بدون نامه نویسنده(گان) مقاله بدون نام بارگذاری گردد. * نگارنده مسئول باید فرم تعهدنامه را که با امضای کلیه نگارندگان و الزامی می باشد در قسمت فایل‌های پیشیناز بارگذاری نماید.

عنوان مقاله

عنوان مقاله باید روان، گویا، مختصر و مفید بوده و در برگیرنده محتوای تحقیق انجام شده باشد. عنوان مقاله نباید بیش از ۲۰ کلمه باشد. در زیر عنوان نام و نام خانوادگی نویسندگان، مرتبه علمی و یا تحصیلات و وابستگی سازمانی، تاریخ، آدرس کامل پستی، شماره تلفن همراه و پست الکترونیک نویسندگان مقاله درج گردد. دقت شود کلمه‌های تشکیل دهنده عنوان با کلمه‌های کلیدی متفاوت باشد.

چکیده: چکیده بایستی شامل حداکثر ۳۰۰ کلمه بوده و بیانگر زمینه و هدف، تحقیق روش بررسی، یافته‌ها، نتیجه‌گیری و ترجیحاً در یک پارگراف باشد. چکیده انگلیسی باید ترجمه کامل چکیده فارسی باشد

واژه های کلیدی:

واژه های کلیدی بایستی ۳-۶ کلمه باشد. واژه های کلیدی چکیده انگلیسی نیز بایستی ترجمه دقیق واژه های چکیده فارسی باشد.

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

مقدمه

باید دربرگیرنده اهمیت پژوهش انجام شده بوده و به بیان مسئله با مروری بر مطالعات و مشاهدات مرتبط با تحقیق که در گذشته انجام شده پرداخته و به منابع معتبری که در انتهای مقاله ذکر شده، استناد شده باشد و در ادامه وجه تمایز نسبت به مطالعات قبلی و لزوم و وجوب آن و در انتها هدف اصلی پژوهش نگاشته شود. مقالاتی که تکراری بوده و در گذشته به کرات در داخل و خارج از ایران در مورد آن مطالعاتی انجام شده، در صورتی که وجه تمایز قانع کننده‌ای نداشته باشد چاپ نخواهد شد.

مواد و روش‌ها

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

نتایج

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

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

بحث

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

تشکر و قدردانی

در این بخش نویسنده (گان) می‌توانند از اشخاص، سازمان‌ها و افراد ذیربطی که در اجرای تحقیق همکاری داشته اند، تشکر و قدر دانی نمایند. این قسمت باید کوتاه و در حدود ۵۰ کلمه باشد.

فهرست منابع

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

..... نتایج مشابهی توسط برخی پژوهشگران نیز گزارش شده است (کریمی و احمدی، ۱۳۸۹)

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

فهرست منابع مورد استفاده در پایان متن به صورت پیوسته و به ترتیب منابع فارسی و انگلیسی ارائه شوند. منابع مورد استفاده به ترتیب حروف الفبای نام خانوادگی نگارنده، (یا اولین نگارنده برای منابعی که بیش از یک

نگارنده دارند) زیر هم آورده شوند. چنانچه از یک نگارنده چندین منبع ذکر شود، ترتیب درج آن‌ها بر حسب سال انتشار، از جدید به قدیم است. اگر از نگارنده‌ای چندین منبع همسال وجود داشته باشد، با گذاشتن حروف a, b و c پس از سال انتشار منابع از یکدیگر متمایز شوند. چنانچه مقالات منفرد و مشترک از یک نگارنده ارائه شود، نخست مقالات منفرد و سپس مقاله‌های مشترک به ترتیب حروف الفبای نام نگارندگان بعدی مرتب شوند. برای یک مقاله به ترتیب نام خانوادگی نگارنده، حرف اول اسم کوچک نگارنده، تاریخ انتشار، عنوان مقاله عنوان کامل مجله، شماره جلد، و اولین و آخرین صفحه مقاله ارائه شود. برای یک کتاب به ترتیب نام خانوادگی و سپس حرف اول نام کوچک نگارنده، تاریخ انتشار، عنوان کامل کتاب، شماره جلد، نام ناشر، محل انتشار و تعداد کل صفحات ارائه شود. در مورد مقاله یا کتاب‌هایی که بیش از یک نویسنده دارند به ترتیب نام خانوادگی و حرف اول نام اولین نویسنده و سپس اول نام نویسندگان بعدی و پس از آن نام خانوادگی آن‌ها ذکر شود. در مورد مرجعی که نویسنده آن مشخص نیست به جای نام نگارنده از "Anonymous" برای منابع انگلیسی و (بی نام) برای منابع فارسی استفاده شود. چنانچه منبع ترجمه شده باشد، در فهرست منابع باید نخست نام نویسنده (گان) کتاب اصلی، عنوان مشخصات آن (به زبان انگلیسی) و سپس نام مترجم (مترجمان) ذکر شود.

مثال‌های برای تنظیم منابع

مقاله از مجله

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

مقاله از کارگاه آموزشی یا علمی

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

مطلب از کتاب

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

مطلب نقل شده یک نویسنده در یک مجموعه مقالات

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

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

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

ذکر مطلب از اینترنت

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

منابع مورد استفاده در متن بدین صورت نگاشته شوند:

بای بوردی و همکاران (۱۳۸۲) گزارش کردند...

اسمیت (۲۰۰۲) گزارش کرد ...

اسمیت و جونز (۲۰۰۲) گزارش کردند...

اسمیت و همکاران (۲۰۰۲) گزارش کردند...

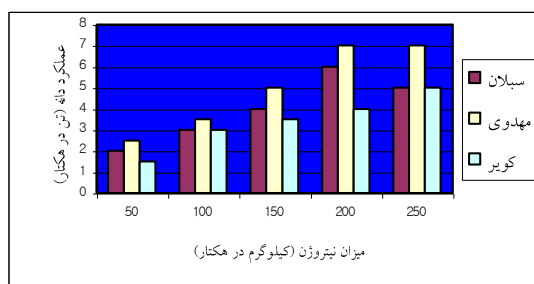
– در صورت عدم رعایت دقیق مطالب فوق‌الذکر، مقاله پذیرفته نمی‌شود و پیش از بررسی به اطلاع نویسنده مسئول می‌رسد. بدیهی است چنانچه مقاله ارسالی با شرایط ذکر شده تهیه و عودت داده شود مجدداً از زمان برگشت که تاریخ واقعی مقاله منظور می‌شود مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

جدول نامناسب

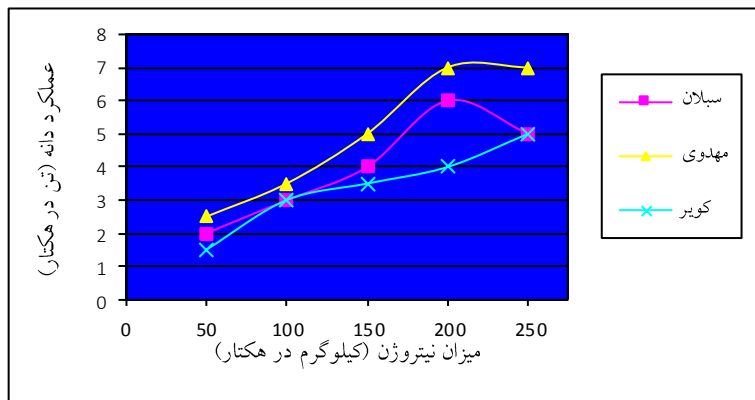
عمق (cm)	pH	EC (dS. m-1)	TNV (%)	OC (%)	<i>Pava il</i>			بافت
					<i>Mge xch</i> (Mg.kg-1)			
۰-۳۰	۸/۲	۷/۶	۲۸	۰/۶۲	۳/۶	۲۹۰	۳۰۰	لومی رسی
۳۰-۶۰	۸/۲	۷/۲	۳۰	۰/۵۰	۰/۶	۲۹۵	۳۰۵	لومی رسی
۶۰-۹۰	۷/۸	۹/۵	۳۳	۰/۲۱	۰/۵	۳۳۲	۲۸۶	لومی شنی

جدول مناسب

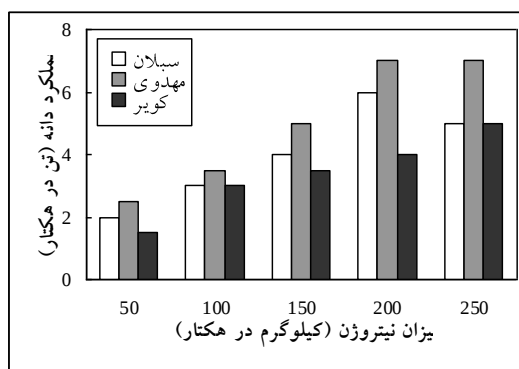
عمق (cm)	pH	EC (dS.m ⁻¹)	TNV (%)	OC (%)	P_{av}	Mg_{ex}	K_{av}	بافت
						(mg.kg ⁻¹)		
0-30	8/3	7/6	28	0/60	3/6	300	290	لومی رسی
30-60	8/2	7/2	30	0/50	/60	305	295	لومی رسی
	7/8	9/5	33	0/21	/50	286	232	لومی شنی



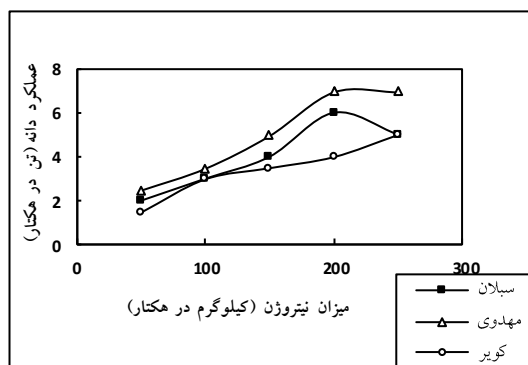
«نامناسب»



«مناسب»



«نامناسب»



«مناسب»

((نشریه پژوهش‌های خاک))

فرم تعهد نامه

نشریه پژوهش‌های خاک

اینجانب نویسنده مسئول مقاله زیر:

- سال‌های اجراء آزمایش ذکر شود

موارد زیر را به آگاهی می‌رسانم:

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

نام نام خانوادگی نویسنده اول: امضاء نویسنده اول مقاله

نام نام خانوادگی نویسنده دوم: امضاء نویسنده دوم مقاله

نام نام خانوادگی نویسنده سوم: امضاء نویسنده سوم مقاله

نام نام خانوادگی نویسنده چهارم: امضاء نویسنده چهارم مقاله

((اسامی داوران مقالات جلد ۳۹ شماره ۲ سال ۱۴۰۴ مجله پژوهش های خاک))

تعداد داوری	اسامی داوران
۱	دکتر محمدرضا امداد
۲	دکتر شاهین اوستان
۲	دکتر میثم چراغی
۱	مهندس عبدالمحمد دریاشناس
۱	دکتر امیر دلاور
۲	دکتر علی زین الدینی
۲	دکتر فریدون سرمیدیان
۲	دکتر عبدالحسین ضبائیان
۱	دکتر مهدی طاهری
۱	دکتر مجتبی فتاحی
۳	دکتر مصطفی مارزی
۲	دکتر فرهاد مشیری
۱	موسوی
۱	دکتر کامران میرزا شاهی
۱	دکتر علی اکبر نوروزی
۱	دکتر نفیسه یغمائیان

مقایسه اثرات کودهای شیمیایی، زیستی و آلی بر رشد و تولید اسانس گل بابونه (*Matricaria chamomilla* L.) آلمانی

علی اصغر ذوالفقاری^{۱*}، آرزو دخت عبدیان^۲، محمدرضا یزدانی^۳، داود کرتولی نژاد^۴ و الهه نیکویی^۵

۱-دانشیار گروه آموزشی بیابان زدایی، دانشکده کویرشناسی دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. azolfaghari@semnan.ac.ir

۲-دانش آموخته گروه آموزشی بیابان زدایی، دانشکده کویرشناسی دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. dokhtabdian@semnan.ac.ir

۳-دانشیار گروه آموزشی بیابان زدایی، دانشکده کویرشناسی دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. m_yazdani@semnan.ac.ir

۴-استادیار گروه آموزشی جنگلداری مناطق خشک، دانشکده کویرشناسی دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. kartooli58@semnan.ac.ir

۵-دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه آموزشی جنگلداری مناطق خشک، دانشکده کویرشناسی دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. elahe.ni76@gmail.com

«مقاله پژوهشی»

دریافت: ۱۴۰۳/۳/۲۷ و پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۱۲

چکیده

مدیریت استفاده از انواع کودهای شیمیایی، دامی و آلی و بقایای آن‌ها در خاک از نظر عملکرد گیاهان و تأثیرات زیست‌محیطی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک نظیر ایران بسیار حائز اهمیت می‌باشد. جهت بررسی اثرات مصرف برخی از کودهای شیمیایی، زیستی، دامی، اسید هیومیک، ورمی کمپوست و بقایای آن‌ها بر میزان رشد، عملکرد گل، عملکرد اسانس، عملکرد کامازولن و اجزای عملکرد گیاه دارویی بابونه آلمانی (*Matricaria chamomilla* L.) آزمایشی به‌صورت گلدانی در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار در ایستگاه مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی ورامین در استان تهران به مدت یک فصل رویشی در سال ۱۳۹۶ اجرا گردید. تیمار کود شیمیایی (NPK) در دو سطح استفاده شد. سطح اول شامل ۱/۵ گرم کود اوره (معادل ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار)، سه گرم کود سوپرفسفات تربیل (معادل ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار)، ۱/۳ گرم کود سولفات پتاسیم (معادل ۲۱۶ کیلوگرم در هکتار) بود. سطح دوم نیز ترکیبی از سه گرم کود اوره (معادل ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار)، چهار گرم کود سوپرفسفات تربیل (معادل ۶۶۵ کیلوگرم در هکتار) و ۲/۶ گرم کود سولفات پتاسیم (معادل ۴۳۲ کیلوگرم در هکتار) بود. تیمار کود vermicompost در دو سطح ۳۰ گرم (معادل پنج‌تن در هکتار) و ۶۰ گرم (معادل ده تن در هکتار) بود. کود دامی نیز در دو سطح ۱۲۰ گرم کود پوسیده گاوی (معادل ۲۰ تن کود دامی در هکتار)، ۱۸۰ گرم کود پوسیده گاوی (معادل ۳۰ تن کود دامی در هکتار) اعمال شد. اسید هیومیک به دو روش کود آبیاری و محلول‌پاشی به غلظت پنج در هزار (پنج گرم در یک لیتر آب) استفاده شد. کود زیستی (BNPK) نیز شامل باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن، حل‌کننده فسفر و حل‌کننده پتاسیم به مقدار ۱۲۵ میلی‌لیتر برای هر گلدان و شاهد (بدون مصرف کود) در ۱۰ تیمار بود. نتایج بدست آمده نشان داد مصرف تیمار سطح دوم کود شیمیایی سبب افزایش میزان رشد اجزای بابونه نسبت به شاهد گردید به‌نحوی که بیشترین ارتفاع بوته (۳۴/۳۵ سانتی‌متر)، تعداد گل (۹۲ عدد گل)، قطر گل (۱/۵۱ سانتی‌متر)، وزن خشک گل (۱۸/۷۰ گرم)، درصد اسانس گل (۰/۵۰۳ درصد) و عملکرد اسانس در ۱۰ بوته (۰/۹۳۹ گرم) در تیمار سطح دوم کود شیمیایی NPK(2) بود. بالاترین عملکرد کامازولن نیز در تیمار کود زیستی مشاهده شد که تفاوت معنی‌داری با تیمار شاهد داشت. تیمار کود زیستی همچنین توانست عملکرد گل، اسانس و کامازولن مطلوبی ایجاد نماید که کاربرد آن‌ها در راستای اهداف کشاورزی ارگانیک و پایدار قابل توصیه می‌باشد. بر اساس نتایج این تحقیق می‌توان به اثرات کودهای بیولوژیک بر گیاه دارویی بابونه امیدوار بود. با توجه به عملکرد مطلوب تیمار کود زیستی کاربرد این تیمار در راستای اهداف کشاورزی ارگانیک و پایدار قابل توصیه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: اسانس، کامازولن، کمپوست، کود زیستی، اجزای عملکرد، بابونه آلمانی

*-آدرس ایمیل نویسنده مسئول: azolfaghari@semnan.ac.ir

استناد: ذوالفقاری، ع.ا، عبدیان، ا.د، یزدانی، م.ر، کرتولی نژاد، د.، نیکویی، ا. ۱۴۰۴. مقایسه اثرات کودهای شیمیایی، زیستی و آلی بر رشد و تولید اسانس گل بابونه آلمانی (*Matricaria chamomilla* L.). مقاله پژوهشی، نشریه پژوهش‌های خاک، (۲) ۳۹، ص ۱۵۳-۱۶۹.



مقدمه

کشور ایران، به دلیل داشتن تنوع اقلیمی بسیار زیاد، مکان مناسبی جهت رشد و نمو انواع گیاهان دارویی می‌باشد. تنوع گیاهان دارویی در ایران شرایط ایده‌آلی برای تقاضای بازارهای خارجی محصولات این گیاهان به صورت عرقیات، اسانس، افشرد و خشک ایجاد نموده است. امروزه با توجه به پیشرفت صنعت داروسازی، بیشتر داروهایی که در معالجه بیماران استفاده می‌گردد، انواع داروهای سنتتیک می‌باشد. لذا ممکن است تصور شود که با عرضه چنین داروهایی از اهمیت گیاهان دارویی کاسته شده و نیاز چندان به کشت و تولید آن‌ها نخواهد بود؛ اما تحقیقات نشان می‌دهد که این تصور صحیح نبوده و باوجود ارائه داروهای مصنوعی مشابه با مواد مؤثره گیاهان دارویی نه تنها از میزان کشت و تولید این گیاهان (لااقل در سطح کشورهای توسعه یافته) کاسته نشده است، بلکه تولید و مصرف آن‌ها نیز روز به روز در حال افزایش می‌باشد (مظهری، ۱۴۰۲؛ حیدرزاده و همکاران، ۱۴۰۰). در قرن نوزدهم، داروهای شیمیایی جای خود را به داروهای گیاهی دادند و بعد از یک دوره طولانی عوارض داروهای شیمیایی مشخص گردید. در حال حاضر به دلیل عوارض داروهای شیمیایی، توجه مردم به مصرف داروهای گیاهی در حال افزایش است (صبور و همکاران، ۱۴۰۱). گیاهان دارویی به دلیل ماهیت طبیعی و وجود ترکیبات مؤثر و همولوگ دارویی در کنار هم سازگاری بهتری با بدن داشته و معمولاً فاقد عوارض ناخواسته هستند (مظهری، ۱۴۰۲؛ پرویزی زاده و همکاران، ۱۴۰۱). امروزه کارخانجات مهم داروسازی دنیا مانند بایر (Bayer) حدود ۳۵٪ کل داروهای خود را از گیاهان دارویی با منشأ صد در صد طبیعی تولید

می‌نمایند. در رابطه با کاربردهای دیگر گیاهان دارویی نیز می‌توان به مواد مؤثره در آن‌ها اشاره نمود که در این میان گیاهان تولیدکننده اسانس از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشند (پرویزی زاده و همکاران، ۱۴۰۱). بر اساس برآوردهای معتبر بانک جهانی تا سال ۲۰۵۰ تجارت گیاهان دارویی به ۵ هزار میلیارد دلار می‌رسد، این میزان در سال ۲۰۲۰ نزدیک به ۲۰۰ میلیارد دلار بوده است به طوری که طبق اعلام سازمان تجارت جهانی ۷ تا ۱۰ درصد تجارت دنیا متعلق به گیاهان دارویی خواهد بود؛ اما با وجود پتانسیل بسیار خوب ایران برای تولید و صادرات گیاهان دارویی، سهم ایران تنها سالانه ۳۵۰ میلیون دلار از این بازار بوده است. به طور کلی ایران ظرفیت بسیار خوبی برای تولید و صادرات گیاهان دارویی دارد. وجود ۱۱ اقلیم از ۱۳ اقلیم جهانی در ایران، ۳۰۰ تابش روز آفتاب بر گیاهان و تنوع گیاهان دارویی بالا باوجود ۸ هزار و ۵۰۰ گیاه دارویی در کشور، ایران را به یکی از بهترین کشورهای جهان در این زمینه تبدیل کرده است. در سال ۱۴۰۲، ۲۶۰ هزار هکتار از زمین‌های زیر کشت به کشت انواع گیاهان دارویی مختلف اختصاص داشت که ۴۰۰ هزار تن محصول از این زمین‌ها برداشت شده و در بازار داخل و خارج قابل استفاده می‌باشد. در حالی که در سال ۱۴۰۳، ۳۰۰ هزار هکتار از اراضی کشور زیر کشت گیاهان دارویی می‌باشد که سالانه حدود ۵۰۰ هزار تن انواع گیاهان دارویی تولید می‌گردد.

ازجمله با ارزش‌ترین داروهای شناخته شده توسط بشر و یکی از پرمصرف‌ترین گیاهان دارویی در اروپا، استرالیا، خاورمیانه، آمریکای شمالی و کشورهای آفریقا، بابونه (*Matricaria chamomilla* L.) گیاهی از تیره کاسنی می‌باشد که بیشتر به دلیل استفاده از

اسانس آبی رنگ آن کشت می‌شود (جوادی و صالحی شانجانی، ۱۴۰۲). عملکرد اقتصادی بابونه گل‌های آن می‌باشد که حاوی مواد مؤثره مختلفی بوده که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان از کامازولن موجود در ترکیبات فرار گلچه‌های لوله‌ای نام برد (ملکیان و همکاران، ۱۳۸۹). در گذشته از گل‌های بابونه صرفاً به صورت سنتی استفاده می‌شد اما در حال حاضر با توجه به کاربرد آن در صنایع آرایشی و بهداشتی، داروسازی، عطرسازی و تهیه چاشنی‌های غذایی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. امروزه مصرف سالانه بابونه در جهان بیش از ۴ هزار تن گل خشک می‌باشد که عمدتاً توسط کشورهای مجارستان، روسیه، آرژانتین، آلمان، چک، اسلواکی، فنلاند، مصر و اخیراً هند تأمین می‌شود. بابونه در مناطق مختلف ایران به صورت خودرو رشد دارد و در چند استان در سطحی محدود کشت می‌شود. گونه‌های مختلف جنس *Matricaria* در نقاط مختلف کشور وجود دارد اما گونه *M. chamomilla* در منطقه غرب لرستان بین خرم‌آباد و دورود، شمال غربی اندیمشک، خوزستان، صالح‌آباد هفتگل، شوشتر، شیراز، ایرانشهر و اطراف تهران یافت می‌شود. تولید زراعی این محصول نیز در کشور، غالباً در استان‌های اصفهان، کهگیلویه و بویراحمد، گلستان و همدان انجام می‌گیرد (جوادی و صالحی شانجانی، ۱۴۰۲؛ رمرودی و همکاران، ۱۴۰۰).

در مدیریت بهره‌برداری از منابع و دستیابی به اهداف کشاورزی پایدار استفاده از سیستم‌های زراعی کم‌نهاد به عنوان شیوه نوین و کاربردی اهمیت قابل توجهی دارد. در کشاورزی پایدار علاوه بر اقتصادی نمودن تولید از طریق استفاده بهینه از کودهای ارگانیک و شیمیایی، افزایش مواد آلی خاک‌ها جهت حفاظت از محیط‌زیست نیز باید مورد توجه قرار گیرد (جهانتیغ و همکاران،

۱۴۰۳؛ میرسیدی و همکاران، ۱۳۹۸). امروزه هدف اصلی متخصصان گیاهان دارویی، افزایش ماده مؤثره این گیاهان و حفظ و توسعه استعدادهای ژنتیکی آن‌ها می‌باشد. مهم‌ترین و اساسی‌ترین راه حفظ و اصلاح شرایط حاصلخیزی خاک و افزایش میزان عملکرد محصولات کشاورزی، مصرف صحیح و متناسب از انواع کودها (حیوانی، کود سبز، شیمیایی، کمپوست گیاهی و غیره) می‌باشد (میرسیدی و همکاران، ۱۳۹۸). در روش‌های سنتی کشاورزی، جهت رسیدن به حداکثر تولید، استفاده از تعداد محدودی از کودهای شیمیایی از قبیل کودهای ازته و فسفره به طور کامل کارساز نمی‌باشد. اگرچه مصرف کودهای شیمیایی به عنوان سریع‌ترین راه جبران کمبود عناصر غذایی خاک در جهان رایج می‌باشد، اما آلودگی خاک، آلودگی آب، هزینه‌های زیاد و مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی و نیز کاهش در کیفیت تولیدات کشاورزی در اثر استفاده نامناسب از این کودها، سبب ایجاد فقدان ترکیب‌های مناسب غذایی و مشکلات زیست‌محیطی فراوان شده است. با این وجود نمی‌توان کودهای شیمیایی را به طول کامل از اکوسیستم‌های زراعی حذف نمود. در این رابطه استفاده از منابع تجزیه شونده و طبیعی با منشأ آلی به همراه کودهای شیمیایی می‌تواند به عنوان راهکار مناسبی جایگزین مصرف کودهای شیمیایی شود که این امر سبب باروری و حفظ ساختمان خاک، فعالیت بیولوژیکی، نگهداری آب و در نهایت اصلاح ساختار فیزیکی و شیمیایی خاک می‌گردد (شامحمدی و همکاران، ۱۴۰۳ و میرسیدی و همکاران، ۱۳۹۸).

اگرچه کودهای بیولوژیک نمی‌توانند جانشین تمامی مقادیر مورد نیاز کودهای شیمیایی باشند، اما می‌توانند کمبود کودهای شیمیایی را تا حد قابل توجهی

جبران نمایند. تحقیقات نشان می‌دهد تلفیق کودهای شیمیایی به همراه منابع آلی و بیولوژیک نتایج مطلوبی در افزایش راندمان تولید محصولات کشاورزی دارد که نشان‌دهنده زراعت ارگانیک و در نتیجه کشاورزی پایدار می‌باشد. با توجه به ارزش دارویی و همچنین ارزش اقتصادی تولید این گیاه، به نظر می‌رسد تلاش در جهت توسعه کشت و افزایش کیفیت بابونه در کشور باید مدنظر قرار گیرد، چراکه در این صورت امکان صادرات و ارزآوری آن نیز وجود خواهد داشت (ابراهیم زاده و همکاران، ۱۴۰۰).

بنابراین، ضروری است روش‌های افزایش بازده تولید گیاهان دارویی و روش‌های بهبود کیفیت و کمیت این گیاهان مورد توجه قرار گیرد. در این تحقیق تأثیر انواع کودهای مختلف بر عملکرد کمی، درصد اسانس و درصد کامازولن گیاه دارویی بابونه آلمانی مورد بررسی قرار گرفت. هدف از این آزمایش، دستیابی به جایگزینی مناسب برای کودهای شیمیایی و جلوگیری از تخریب بافت و ساختمان خاک می‌باشد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان تهران، ایستگاه تحقیقاتی ورامین در یک فصل رویش انجام گرفت. در این آزمایش تأثیر تیمارهای مختلف کودی بر بابونه آلمانی بررسی شد. آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار در شرایط گلخانه انجام گردید. کاشت بذره‌های بابونه در ۳۰ فروردین ۱۳۹۶ به صورت خزانه‌ای در داخل سینی‌های کشت انجام شد. بذره‌های مورد نظر از مرکز تحقیقات اصفهان تهیه و کشت گردید. هنگامی که ارتفاع بوته‌ها به ۵ سانتی‌متر رسید به گل‌دان

انتقال داده شدند و در فضای باز نگهداری و آبیاری شدند. حجم خاک کلیه گل‌دان‌های مورد آزمایش ۸ کیلوگرم بود. در ابتدای کاشت آبیاری هفته‌ای یک بار انجام شد؛ اما با گرم شدن هوا برای اینکه گیاه دچار تنش کم‌آبی نشود آبیاری هفته‌ای دو بار ادامه پیدا کرد. تیمار کود شیمیایی در این آزمایش شامل NPK در دو سطح بود که در سطح اول ۱/۵ گرم کود اوره (معادل ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار)، سه گرم کود سوپرفسفات تربیل (معادل ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار)، ۱/۳ گرم کود سولفات پتاسیم (معادل ۲۱۶ کیلوگرم در هکتار) و در سطح دوم به صورت سه گرم کود اوره (معادل ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار)، چهار گرم کود سوپرفسفات تربیل (معادل ۶۶۵ کیلوگرم در هکتار) و ۲/۶ گرم کود سولفات پتاسیم (معادل ۴۳۲ کیلوگرم در هکتار) بود. یک کود زیستی پودری NPK محصول شرکت زیست فناوری سبز شامل ۳ بسته ۱۰۰ گرمی حاوی ازوتوبارور (ازوتوباکترهای تثبیت‌کننده نیتروژن)، فسفوبارور (سویه‌های سودوموناس و باسیلوس حل‌کننده فسفر) و پتابارور (باکتری‌های سویه سودوموناس حل‌کننده پتاسیم) با جمعیت 10^7 تا 10^8 CFU/gr مورد استفاده قرار گرفت. کود ورمی کمپوست در دو سطح ۳۰ گرم ورمی کمپوست (معادل پنج تن در هکتار)، ۶۰ گرم ورمی کمپوست (معادل ۱۰ تن در هکتار) و کود دامی در دو سطح ۱۲۰ گرم کود پوسیده گاوی (معادل ۲۰ تن کود دامی در هکتار)، ۱۸۰ گرم کود پوسیده گاوی (معادل ۳۰ تن کود دامی در هکتار) بوده است. کود اسید هیومیک نیز در دو سطح اسید هیومیک به روش کودآبیاری و محلول‌پاشی بر سطح برگ تیمار گردید. در نهایت تیمار شاهد نیز به شکل عدم مصرف کود بود. به‌طور کلی ۱۰ تیمار مورد بررسی قرار گرفت که به

کود دامی ۳۰ تن در هکتار، HW: اسید هیومیک به روش آب آبیاری، HS: اسید هیومیک به روش محلول‌پاشی. مشخصات کود دامی و ورمی کمپوست مورد استفاده در این تحقیق به ترتیب در جدول یک و دو آورده شده است.

اختصار در این تحقیق عبارت‌اند از CO: تیمار شاهد، NPK(1): کود شیمیایی سطح ۱، NPK(2): کود شیمیایی سطح ۲، BNPK: کود زیستی، VC5: ورمی کمپوست پنج‌تن در هکتار، VC10: ورمی کمپوست ۱۰ تن در هکتار، M20: کود دامی ۲۰ تن در هکتار، M30:

جدول ۱- تجزیه نمونه کود دامی (گاوی پوسیده) مورد استفاده در تحقیق حاضر

هدایت الکتریکی (EC) (دسی زیمنس بر متر)	pH	فسفر (درصد)	پتاسیم (درصد)	کلسیم (درصد)	نیترات (درصد)	کربن آلی (درصد)	آهن (گرم در کیلوگرم)	روی (گرم در کیلوگرم)	مس (گرم در کیلوگرم)	سرب (گرم در کیلوگرم)	منگنز (گرم در کیلوگرم)
۲۰/۳	۷/۶۴	۰/۶۹	۲/۳۸	۱/۵۳	۱/۸۷	۳۱/۴	۴/۳۹	۰/۱۶۸	۰/۰۴۸	۰/۰۱۶	۰/۲۹۸

منبع: گزارش آزمایشگاه بخش خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان تهران

جدول ۲- تجزیه نمونه ورمی کمپوست مورد استفاده در تحقیق حاضر

هدایت الکتریکی (EC) (دسی زیمنس بر متر)	pH	فسفر (درصد)	پتاسیم (درصد)	کلسیم (درصد)	نیترژن کل (درصد)	سدیم (درصد)	کربن آلی (درصد)	آهن (گرم در کیلوگرم)	روی (گرم در کیلوگرم)	مس (گرم در کیلوگرم)	منگنز (گرم در کیلوگرم)
۱/۲۵	۷/۵۵	۰/۴۳	۰/۴	۲/۶۹	۱/۶۵	۰/۸	۴۲	۴/۹	۰/۱۳۷	۰/۰۲۸	۰/۲۸۵

منبع: گزارش آزمایشگاه بخش خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان تهران

نحوه انجام تیمارهای آزمایش

جهت اعمال تیمارهای آزمایش بر اساس دستورالعمل شرکت سازنده، کودهای شیمیایی NPK را در آب حل کرده و در دو نوبت یکی در ابتدای کاشت و دیگری یک ماه بعد در گلدان‌ها ریخته شد. جهت اعمال کود زیستی (BNPK)، محتوای ۳ پاکت‌های ۱۰۰ گرمی حاوی ازوتوبارور (باکتری‌های تثبیت‌کننده نیترژن)، فسفوبارور (باکتری‌های حل‌کننده فسفر) و پتآبارور (باکتری‌های حل‌کننده پتاسیم) به‌طور مساوی باهم

مخلوط شدند و در طی سه نوبت هر بار یک قسمت در پنج لیتر آب حل شده و در گلدان‌ها ریخته شد. بار اول در ابتدای تحقیق و دو نوبت دیگر نیز بعد از رسیدن گیاه به دو سانتی‌متر به فاصله یک هفته تکرار گردید. در مجموع به هر گلدان ۱۲۵ میلی‌لیتر از کود زیستی داده شد. اسید هیومیک با غلظت پنج در هزار (پنج گرم در یک لیتر آب)، به دو صورت کودآبیاری و محلول‌پاشی و در پنج نوبت بعد از رسیدن گیاه به دو سانتی‌متر انجام و هفته‌ای یک‌بار انجام شد. در هر بار آبیاری به محلول اسید هیومیک به هر گلدان حدود ۱ لیتر محلول اسید

هیومیک داده شد، بنابراین در طول دوره رشد حدود ۲۵ گرم اسید هیومیک به صورت محلول یا همراه با آب به گدانها اضافه شد. کودهای ورمی کمپوست و کود دامی نیز با خاک گلدان مخلوط شدند. مشخصات خاک مورد استفاده و آب آبیاری در این تحقیق به ترتیب در جدول سه و چهار نشان داده شده است.

جدول ۳- برخی ویژگی‌های خاک مورد استفاده در تیمارها

EC (دسی زیمنس بر متر)	pH	نیترژن کل (درصد)	فسفر کل (میلی گرم در کیلوگرم)	پتاسیم کل (میلی گرم در کیلوگرم)	کربن آلی (درصد)	رس (درصد)	سیلت (درصد)	شن (درصد)	بافت
۱/۱	۶	۰/۸	۲۳/۶	۱۲۰/۳	۰/۷۴	۲۸	۳۴	۳۸	لوم رسی

منبع: گزارش آزمایشگاه بخش خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان تهران

جدول ۴- نتایج تجزیه شیمیایی آب مورد استفاده جهت آبیاری گلدانها

SAR	میلی اکی والان در لیتر						pH	EC (دسی زیمنس بر متر)
	کاتیون‌ها	Na ⁺	Ca ²⁺ Mg ²⁺	آنیون‌ها	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	
۱/۲	۸/۳	۲/۲	۶/۱	۸/۵	۲/۳	۱/۵	۴/۷	۷/۶

منبع: گزارش آزمایشگاه بخش خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان تهران

گیری کلونجر و روش تقطیر با آب استفاده شد (ربیعی و همکاران، ۱۴۰۳).

استخراج اسانس

جهت استخراج اسانس، مقدار ۱۰۰ گرم از سرشاخه گل دار بابونه را در مجاورت جریان هوای آزاد خشک کرده و پس از خردکردن نمونه‌ها با استفاده از روش تقطیر با آب به وسیله دستگاه کلونجر اقدام به استخراج اسانس گیاه گردید. مدت زمان استخراج اسانس برای تمامی نمونه‌ها به طور یکسان ۲/۵ ساعت بود. پس از ۲/۵ ساعت، اسانس به دست آمده در ظرف شیشه‌ای جهت رطوبت‌گیری ریخته شد. جهت گرفتن رطوبت موجود در اسانس، از ماده شیمیایی سولفات سدیم استفاده و سپس وزن خالص اسانس برای هر نمونه مشخص شد. پس از آن نیز مقدار وزنی اسانس و درصد

صفات بررسی شده شامل ارتفاع بوته، تعداد گل در بوته، قطر گل، وزن خشک گل، درصد اسانس گل، عملکرد اسانس در سه بوته، درصد کامازولن و عملکرد کامازولن (حاصل ضرب عملکرد اسانس در بوته در درصد کامازولن تقسیم بر ۱۰۰) بود. جهت اندازه گیری عوامل مورد نظر، از هر گلدان میانگین صفات بوته‌ها اندازه‌گیری و مقادیر میانگین برای هر گلدان در نظر گرفته شد.

جهت خشک کردن نمونه‌ها، ریشه، ساقه، برگ و سرشاخه‌های آن‌ها را جدا نموده و هر کدام به طور جداگانه با خط‌کش اندازه‌گیری شد و سپس به مدت ۷۲ ساعت درون آون با دمای ۷۵ درجه قرار داده شدند. پس از خشک شدن، نمونه‌ها توزین شدند. تعدادی از نمونه‌ها نیز پس از برداشت در سایه خشک شدند. جهت اندازه‌گیری میزان اسانس نیز از دستگاه اسانس

وزنی اسانس هر نمونه مشخص گردید. از حاصل ضرب درصد اسانس به دست آمده در مقدار سرشاخه تولیدی (ماده خشک) در هر گرم، میزان اسانس تولیدی در هر گلدان به دست آمد (مهرنیا و حسینی، ۱۴۰۲).

نتایج

بررسی نتایج اثر تیمارهای مختلف کودی بر ویژگی‌های کیفی بابونه آلمانی

بر اساس نتایج حاصل از تجزیه واریانس مشخص گردید اثر مصرف تیمارهای مختلف کودی مانند کود دامی، اسید هیومیک، کود بیولوژیک، کود شیمیایی و ورمی کمپوست اثر معنی‌داری بر ارتفاع بوته، تعداد گل، قطر گل و وزن خشک گل بابونه آلمانی در سطح احتمال یک درصد داشته است (جدول ۵).

تجزیه و تحلیل داده‌ها

آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی در چهار تکرار انجام شد. جهت انجام محاسبات آماری، اطلاعات به دست آمده با استفاده از نرم‌افزار SAS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مقایسات میانگین از طریق آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال

جدول ۵- تجزیه واریانس صفات مختلف، تحت تأثیر مصرف تیمارهای مختلف کودی در گیاه بابونه آلمانی

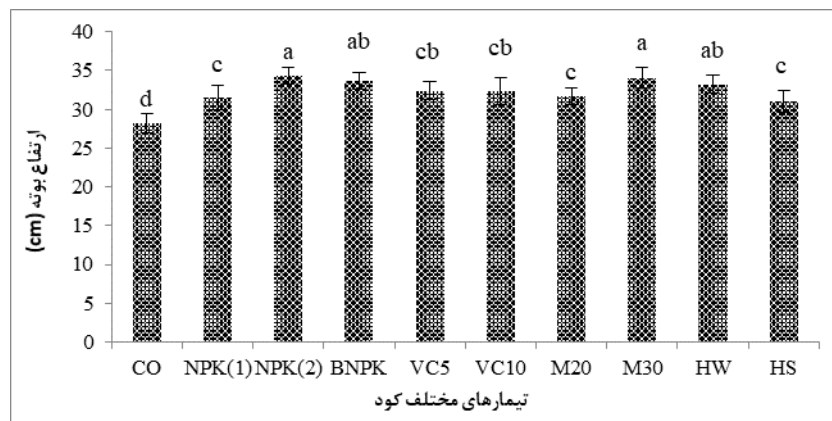
منابع تغییرات S. O. V	درجه آزادی df	ارتفاع بوته	تعداد گل	قطر گل	وزن خشک گل
اثر تیمارها	۹	۱۲/۷۷ **	۵۰۱/۱۶۹ **	۰/۴۵۴۸ **	۱۵/۵۸۱ **
اشتباه آزمایشی	۳۰	۱/۰۳۷	۱۲/۷۴۱۷	۰/۰۰۰۷	۰/۷۴۳۶
ضریب تغییرات (CV)		٪ ۳/۱۴	٪ ۴/۴۶	٪ ۱/۹۱	٪ ۵/۶۳

* اختلاف معنی‌دار در سطح $\alpha=0.05$ ، ** اختلاف معنی‌دار در سطح $\alpha=0.01$ و ns اختلاف معنی‌دار ندارد.

ارتفاع بوته

نتایج به دست آمده نشان داد مصرف کودهای مختلف سبب افزایش معنی‌دار ارتفاع بوته بابونه آلمانی نسبت به شاهد شدند. بیشترین ارتفاع بوته به ترتیب از

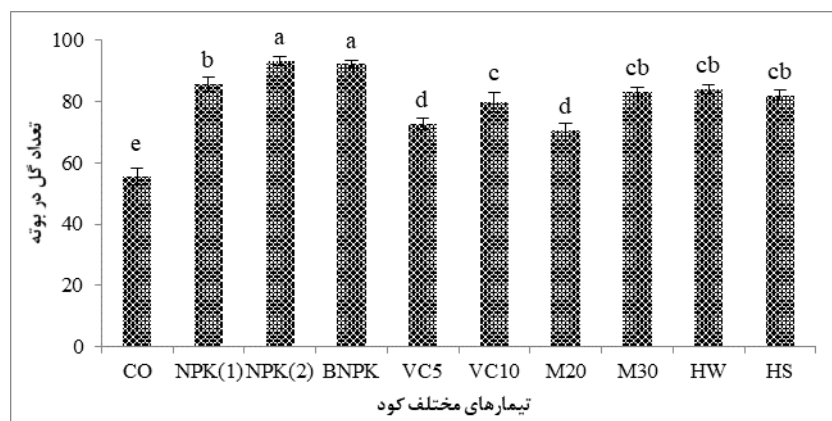
مصرف سطح دوم کود شیمیایی (NPK (۲)) با ۳۴/۳۵ سانتی‌متر و تیمار مصرف ۳۰ تن در هکتار کود دامی (M30) با ۳۴/۵۰ بود. کمترین میزان آن نیز در شاهد با ارتفاع ۲۸/۲۷ سانتی‌متر به دست آمد (شکل ۱).



شکل ۱- تأثیر تیمارهای مختلف کود بر میانگین ارتفاع بوته گیاه بابونه آلمانی

تعداد گل

بررسی مقایسه میانگین مصرف تیمارهای مختلف کودی نشان داد که مصرف کودهای مختلف سبب افزایش معنی دار تعداد گل در بوته بابونه آلمانی نسبت به شاهد می گردد. در میان تیمارها، بیشترین تعداد گل از تیمار کود شیمیایی NPK(2) با ۹۲ گل و کمترین آن از تیمار شاهد با ۵۵ گل به دست آمد (شکل ۲).



شکل ۲- تأثیر تیمارهای مختلف کودی بر میانگین تعداد گل در بوته گیاه بابونه آلمانی

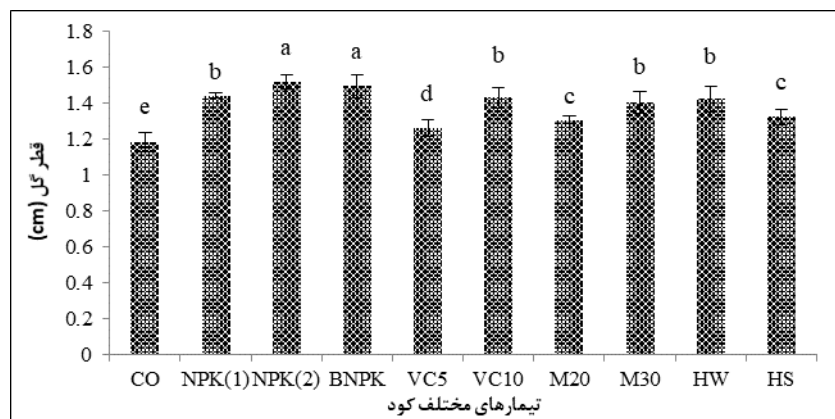
شد که نسبت به شاهد ۱/۱۸ سانتی متر اختلاف معنی دار داشت. کمترین قطر گل نیز در تیمار شاهد مشاهده گردید. مصرف اسید هیومیک به روش محلول پاشی و کود دامی ۲۰ تن در هکتار سبب افزایش قطر گل نسبت

قطر گل

بر اساس نتایج به دست آمده، بیشترین قطر گل از مصرف سطح دوم کود شیمیایی با ۱/۵۱ سانتی متر و تیمار کود زیستی (BNPK) با ۱/۴۹ سانتی متر حاصل

نسبت به کود شیمیایی NPK(2) و کود زیستی کاهش
معنی‌دار داشت (شکل ۳).

به تیمار شاهد گردید که با تیمار شاهد اختلاف معنی‌دار
داشت. مصرف تیمار ورمی کمپوست پنج‌تن در هکتار
نیز سبب افزایش قطر گل نسبت به تیمار شاهد شد که

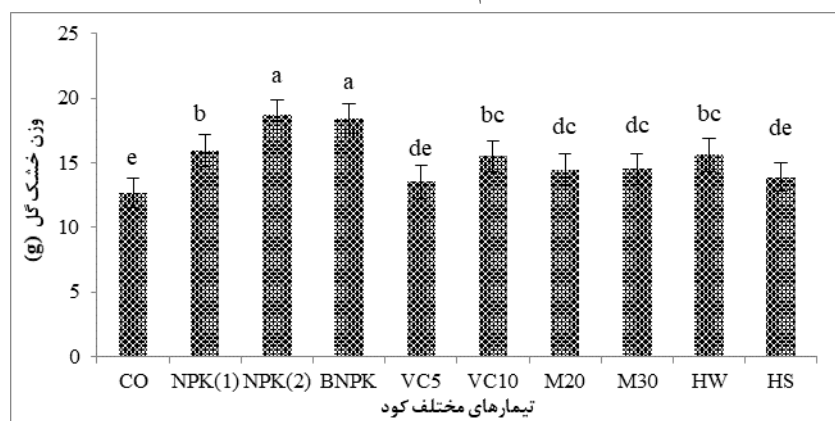


شکل ۳- تأثیر تیمارهای مختلف کودی بر میانگین قطر گل در بوته گیاه بابونه آلمانی

اختلاف معنی‌دار داشت. در بین تیمارهای مطالعه شده
کمترین وزن خشک گل در تیمار مصرف اسید هیومیک
به روش محلول‌پاشی (HS) با ۱۵/۵۹ گرم و تیمار
مصرف پنج‌تن کود ورمی‌کمپوست (VC5) با
۱۳/۵۲ گرم مشاهده شد (شکل ۴).

وزن خشک گل

بررسی مقایسه میانگین وزن خشک گل در
بوته بابونه آلمانی نشان داد که بیشترین وزن خشک گل
از تیمار NPK(2) مصرف کود دوم کود شیمیایی
با ۱۸/۷۰ گرم و تیمار مصرف کود زیستی (BNPK) با
۱۸/۴۰ گرم به دست آمد که نسبت به شاهد ۱۲/۶۸ گرم



شکل ۴- تأثیر تیمارهای مختلف کودی بر میانگین وزن خشک گل در بوته گیاه بابونه آلمانی

بررسی نتایج اثر تیمارهای مختلف کودی بر

اسانس و کامازولن گیاه بابونه آلمانی

بر درصد اسانس گل، عملکرد اسانس در ده بوته، درصد کامازولن و عملکرد کامازولن در ده بوته در سطح احتمال یک درصد وجود دارد (جدول ۶).

نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد

که اختلاف معنی داری میان اثر تیمارهای مختلف کودی

جدول ۶- تجزیه واریانس صفات مختلف تحت تأثیر مصرف تیمارهای مختلف کودی در گیاه بابونه آلمانی

منابع تغییرات S. O. V	درجه آزادی df	درصد اسانس گل	عملکرد اسانس در ده بوته	درصد کامازولن	عملکرد کامازولن در ده بوته
اثر تیمارها	۹	۰/۰۰۲۳۴۶ **	۰/۰۶۳۸۸ **	۵۶/۶۳۳۸ **	۰/۳۵۰۰ **
اشتباه آزمایشی	۳۰	۰/۰۰۰۰۷۶	۰/۰۰۱۷۶	۲/۱۹۸۳	۰/۰۳۳۸۳
ضریب تغییرات (CV)		٪ ۱/۹۱	٪ ۵/۹۹	٪ ۳/۳۹	٪ ۶/۰۸

** اختلاف معنی دار در سطح یک درصد و NS اختلاف معنی دار ندارد.

درصد اسانس گل

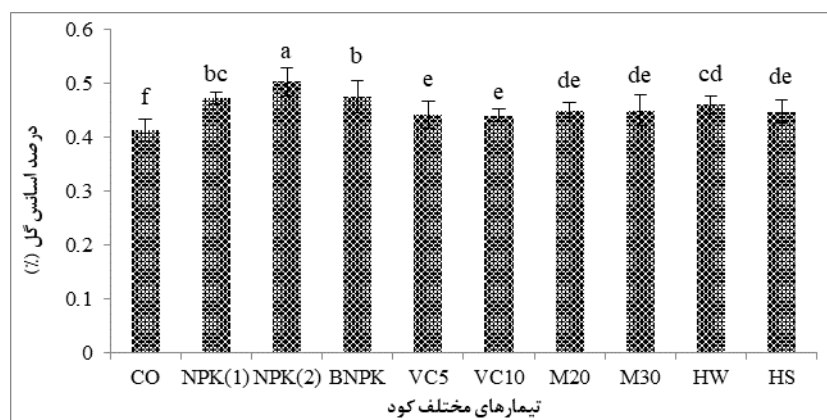
بررسی مقایسه میانگین نشان داد که مصرف

کودهای مختلف سبب افزایش معنی دار درصد اسانس

گل در بوته بابونه آلمانی نسبت به شاهد می گردد.

بیشترین درصد اسانس گل مربوط به NPK(2) مصرف

کود سطح دوم شیمیایی با ۰/۵۰۳ درصد و تیمار مصرف کود زیستی (BNPK) با ۰/۴۷۵ درصد بود. کمترین میزان درصد اسانس گل نیز در شاهد مشاهده شد (شکل ۵).

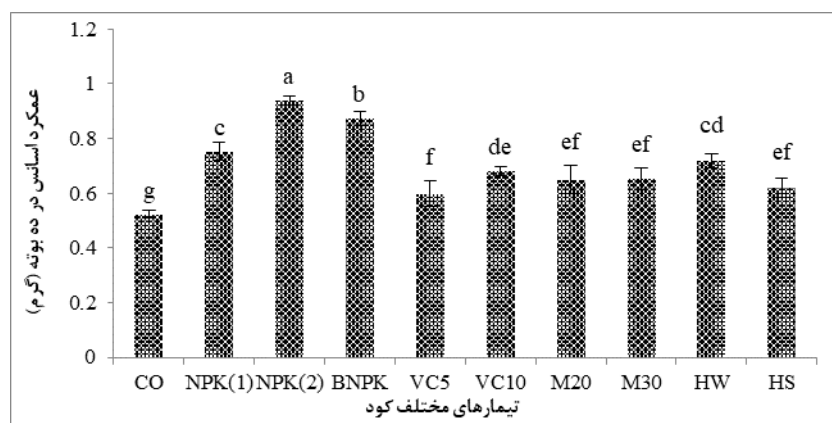


شکل ۵- تأثیر تیمارهای مختلف کودی بر میانگین درصد اسانس در گیاه بابونه آلمانی

عملکرد اسانس در ده بوته

کمترین میزان عملکرد اسانس در ده بوته نیز در شاهد و تیمار VC5 (ورمی کمپوست پنج‌تن در هکتار) به دست آمد (شکل ۶).

بررسی مقایسه میانگین مصرف تیمارهای مختلف کودی نشان داد که اختلاف معنی‌داری میان مصرف کودهای مختلف و عملکرد اسانس در ده بوته بابونه آلمانی نسبت به شاهد وجود دارد. بیشترین عملکرد اسانس در ده بوته مربوط به مصرف سطح دوم کود شیمیایی (NPK(2)، با ۰/۹۳۹ گرم و پس از آن تیمار مصرف کود زیستی (BNPK) با ۰/۸۷۴ گرم بود.

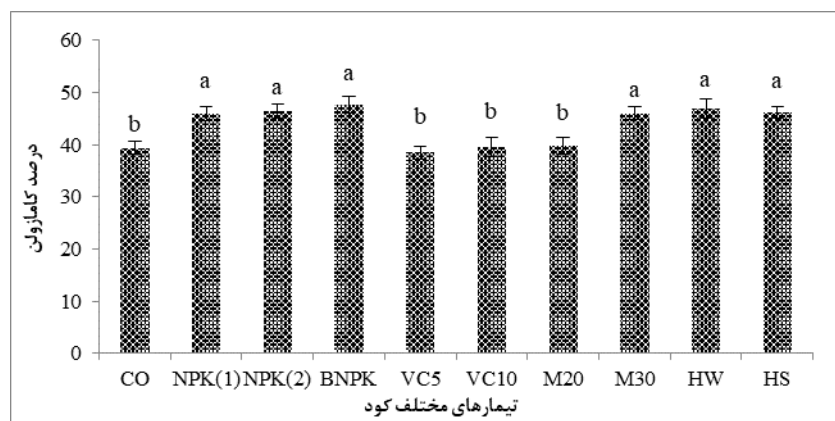


شکل ۶- تأثیر تیمارهای مختلف کودی بر میانگین درصد اسانس در ده بوته در گیاه بابونه آلمانی

شاهد ۳۹/۴۳ درصد اختلاف معنی‌دار داشت. تیمار اسید هیومیک به روش آب آبیاری (HW) نیز با ۴۶/۹۳ درصد پس از تیمار کود زیستی دارای بیشترین درصد بود. کمترین درصد کامازولن هم به ترتیب در تیمار پنج‌تن کود ورمی کمپوست (VC5) و شاهد به دست آمد (شکل ۷).

درصد و عملکرد کامازولن در گیاه بابونه

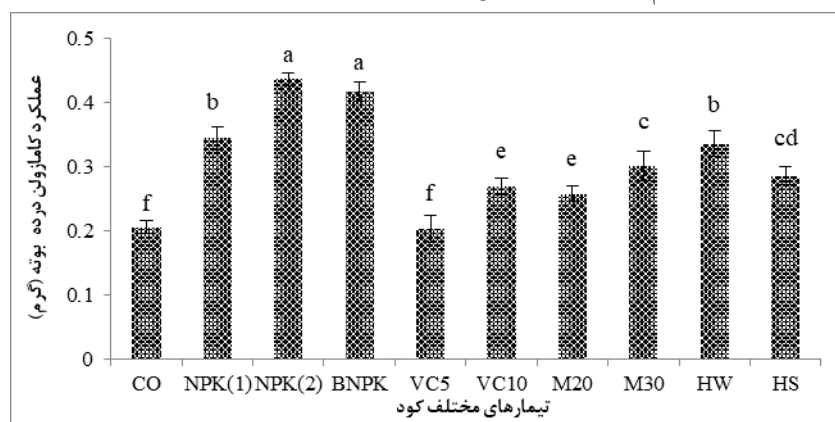
نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که استفاده از کودهای مختلف سبب افزایش معنی‌دار عملکرد اسانس در بابونه آلمانی نسبت به شاهد می‌گردد. بیشترین عملکرد کامازولن از تیمار مصرف کود زیستی (BNPK) با ۴۷/۶۸ درصد حاصل شد که نسبت به



شکل ۷- تأثیر تیمارهای مختلف کودی بر میانگین درصد کامازولن در گیاه بابونه آلمانی

(BNPK) با ۰/۴۱۷ گرم عملکرد کامازولن در ده بوته بیشتری نسبت به سایر تیمارها نشان دادند. کمترین عملکرد کامازولن در ده بوته نیز در تیمار شاهد با ۰/۲۰۶ گرم به دست آمد (شکل ۸).

بررسی جدول مقایسه میانگین عملکرد کامازولن در ده بوته تحت تأثیر تیمارهای کودی مختلف نشان داد که مصرف کودهای مختلف سبب افزایش معنی‌دار عملکرد کامازولن در ده بوته در بابونه آلمانی نسبت به شاهد می‌گردد. در بین تیمارها، تیمار کود شیمیایی NPK(2) با ۰/۴۳۷ گرم و کود زیستی



شکل ۸- تأثیر تیمارهای مختلف کودی عملکرد کامازولن در ده بوته در گیاه بابونه آلمانی

کامازولن و عملکرد کامازولن در ده بوته) گیاه بابونه آلمانی داشته است. بیشترین ارتفاع بوته در تیمار کود شیمیایی NPK(2) با ۳۴/۳۵ سانتی‌متر و تیمار کود دامی ۳۰ تن در هکتار (M30) با ۳۴/۵۰ سانتی‌متر به دست آمد. نتایج به دست آمده از این آزمایش با تحقیق

بحث

نتایج به دست آمده نشان داد که تیمارهای مورد بررسی اثر معنی‌داری بر صفات کمی (ارتفاع بوته، قطر گل، تعداد گل، وزن خشک گل) و صفات کیفی (درصد اسانس، عملکرد اسانس در ده بوته، درصد

(2) به دست آمد؛ بنابراین مصرف کود شیمیایی NPK(2) سبب افزایش صفات کمی و کیفی در گیاه بابونه آلمانی شد. نتایج تحقیق رحیم زاده و همکاران (۱۳۹۰) بر روی گیاه دارویی بادرشبو (*Dracocephalum moldavica*) نشان داد که مصرف کود شیمیایی سبب افزایش معنی‌دار عملکرد دانه، ماده خشک برگ و عملکرد بیولوژیک گیاه نسبت به شاهد می‌گردد که با نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق که مشخص شد کود شیمیایی NPK(2) اثر مثبتی بر روی صفات گیاه بابونه دارد همسو می‌باشد.

بررسی‌های انجام‌گرفته بر روی نعنای ژاپنی (*Mentha arvensis*) نیز نشان داد که مصرف کودهای شیمیایی در حدود ۲۳ درصد نسبت به عدم مصرف کود سبب افزایش عملکرد کمی و کیفی گیاه می‌شود بنابراین مصرف کودهای شیمیایی به‌عنوان سریع‌ترین راه جهت جبران کمبود عناصر غذایی و حاصلخیزی خاک شناخته می‌شود (ملکوتی و ریاضی همدانی، ۱۳۷۱).

تیمار کود زیستی BNPK پس از تیمار کود شیمیایی NPK(2) دارای بیشترین درصد در تمامی صفات موردبررسی به‌جز ارتفاع گل بود. امروزه کودهای بیولوژیک به‌عنوان یک جایگزین مناسب برای کودهای شیمیایی باهدف افزایش باروری خاک و تولید محصولات در کشاورزی پایدار محسوب می‌شوند (کویلا و قوش، ۲۰۲۲). بر اساس اظهارات خان و همکاران (۲۰۲۳) کودهای بیولوژیک در مقایسه با مواد شیمیایی مزیت‌های قابل‌توجهی دارند؛ ازجمله این‌که در چرخه غذایی، تولید مواد سمی و میکروبی نمی‌نمایند، قابلیت تکثیر خود به خودی دارند و باعث اصلاح خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک می‌شوند.

عسگریان و همکاران (۱۳۹۷) مطابقت دارد که بیان نمودند استفاده از کود کامل NPK سبب افزایش ارتفاع گیاه ریحان (*Ocimum basilicum* L.) می‌گردد. علاوه بر این، میرسیدی و همکاران (۱۳۹۸) با مقایسه اثر کودهای آلی، شیمیایی، زیستی و اسیدهای آمینه بر صفات کمی و کیفی بابونه آلمانی در برداشت‌های مختلف، علت افزایش ارتفاع را بهبود بستر رشد توسط کودهای شیمیایی، در دسترس بودن عناصر غذایی و در نتیجه افزایش رشد رویشی گیاه به‌خصوص تا پیش از مرحله گلدهی عنوان نمودند.

احمدیان و همکاران (۱۳۹۰) نیز در تحقیق خود بر روی گل بابونه آلمانی (*Matricaria chamomilla* L.) به این نتیجه رسیدند که کودهای دامی به‌طور معنی‌داری می‌توانند سبب افزایش عملکرد گیاه شوند. کودهای آلی به‌ویژه کودهای دامی دارای مقادیر زیادی مواد آلی هستند که می‌توانند به‌عنوان منبع غنی از عناصر مورد استفاده قرار گیرند (میرسیدی و همکاران، ۱۳۹۸). نتایج این تحقیق با نتایج تحقیق میری و درزی (۱۳۹۷) که در تحقیق خود بر گیاه دارویی بادرشبو (*Dracocephalum moldavica* L.) بیان نمودند مصرف کود دامی سبب افزایش ارتفاع بوته و افزایش تعداد ساقه و گل می‌شود مطابقت دارد. کود دامی با بهبود وضعیت فیزیکی و شیمیایی خاک، عناصر بیشتری را در اختیار گیاه قرار می‌دهد که در نتیجه میزان فتوسنتز افزایش‌یافته و باعث تولید بیشتر سلول‌ها، افزایش ارتفاع و در نهایت افزایش تعداد ساقه و گل می‌شود (میرسیدی و همکاران، ۱۳۹۸).

بیشترین تعداد گل، قطر گل، وزن خشک گل، درصد اسانس گل، عملکرد اسانس در ده بوته و عملکرد کامازولن در ده بوته نیز در تیمار کود شیمیایی NPK

فلاحی و همکاران (۲۰۱۰) تأثیر کودهای بیولوژیک بر عملکرد کمی و کیفی گیاه دارویی بابونه آلمانی (*Matricaria chamomilla*) را ارزیابی نمودند. تیمارهای این آزمایش شامل کود بیولوژیک نیتروکسین، باکتری‌های حل‌کننده فسفات، مخلوط هر دو کود بیولوژیک و تیمار شاهد (عدم استفاده از کود) بود. سانچز گوین و همکاران (۲۰۰۵) در تحقیق خود گزارش نمودند که کاربرد کودهای بیولوژیک در گیاهان دارویی بابونه و همیشه‌بهار سبب افزایش عملکرد گل می‌شود که با نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق مطابقت دارد.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد که بیشترین درصد کامازولن در تیمار BNPK و پس‌از آن در تیمار HW (اسید هیومیک به روش آب آبیاری) می‌باشد. استفاده از انواع کودهای طبیعی از جمله اسید هیومیک بدون اثرات مخرب زیست‌محیطی خصوصاً در شرایط متغیر محیطی می‌تواند بسیار سودمند باشد، لذا از اسید هیومیک به‌عنوان کود آلی دوستدار طبیعت نیز نام‌برده می‌شود. اسید هیومیک با کودهای مایع دیگر قابل اختلاط بوده و می‌تواند به خوبی در آب حل شود بنابراین می‌توان آن را از طریق محلول‌پاشی، مصرف خاکی و سیستم‌های آبیاری تحت فشار مورد استفاده قرارداد. اسید هیومیک از طریق اثرات هورمونی و با تأثیر بر متابولیسم سلول‌های گیاهی و افزایش جذب عناصر غذایی سبب افزایش رشد و ارتفاع گیاه، افزایش جذب پتاسیم، نیتروژن، فسفر، منیزیم، کلسیم و همچنین کاهش اثرات تنش خشکی در گیاه نیز می‌شود (جهان و همکاران، ۱۳۹۴). همچنین این ماده حاوی بسیاری از عناصر غذایی می‌باشد که حاصلخیزی خاک و محتوای

آلی خاک را افزایش داده و در نتیجه رشد و عملکرد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (هارتویگسن و ایوانز، ۲۰۰۰). نتایج تحقیق سوگیر و هاناچی (۲۰۱۷) نشان داد که کاربرد غلظت مناسب اسید هیومیک، درصد جوانه‌زنی و رشد دانه‌های کنجد را افزایش داده است. مطالعه گوهری و همکاران (۱۳۹۲) نیز بر روی گیاه ریحان (*Ocimum basilicum* L.) در سطوح شوری مختلف نشان داد استفاده از اسید هیومیک سبب افزایش وزن تر و خشک اندام هوایی و عملکرد اسانس ریحان نسبت به شاهد می‌گردد. همچنین تعداد زیادی از گزارش‌ها نیز تأثیر مواد هیومیکی بر افزایش رشد ساقه در ارقام مختلف گونه‌های گیاهی تحت شرایط گوناگون را مورد تأیید قرار داده است. در تحقیق دیگری نیز مشخص شد که مصرف مواد هیومیکی سبب افزایش وزن خشک، عملکرد ذرت و گیاهچه‌های یولاف می‌شود (Sharif et al., 2002). نتایج تحقیق شریف و همکاران (۲۰۰۲) بر روی اثر محلول‌پاشی اسید هیومیک بر گندم نیز نشان داد که اسید هیومیک وزن خشک ساقه و ریشه، عملکرد دانه، باروری سنبله و محتوی پروتئین دانه را افزایش می‌دهد. همچنین اسید هیومیک با افزایش فعالیت آنزیم رایبیسکو می‌تواند سبب افزایش فعالیت فتوسنتزی گیاه شود.

نتیجه‌گیری نهایی

انگیزه اصلی در تولید کود بیولوژیک، توجه جدی به عوارض زیست‌محیطی ناشی از به‌کارگیری بی‌رویه و نامتعادل کود شیمیایی و قیمت زیاد و رو به افزایش آن در بازار جهانی می‌باشد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که مصرف تیمار سطح دوم کود شیمیایی (NPK(2)) سبب ایجاد بیشترین میانگین ارتفاع بوته،

گیاه دارویی بابونه امیدوار بود. با توجه به عملکرد مطلوب تیمار کود زیستی کاربرد این تیمار در راستای اهداف کشاورزی ارگانیک و پایدار قابل توصیه می‌باشد؛ لذا پیشنهاد می‌گردد حداقل برای تولید محصول ارگانیک بابونه از کودهای زیستی (BNPK) و کود دامی استفاده گردد.

تعداد گل، قطر گل، وزن خشک گل، عملکرد اسانس و عملکرد کامازولن شد؛ اما کود بیولوژیک بیشترین مقدار درصد کامازولن را در گل بابونه ایجاد نمود و در سایر تیمارها نیز از نظر میانگین یا اختلاف معنی‌دار آماری با سطح دوم کود شیمیایی نداشته و یا در جایگاه دوم نسبت به کل تیمارها برخوردار بود؛ بنابراین بر اساس نتایج این تحقیق می‌توان به اثرات کودهای بیولوژیک بر

فهرست منابع

۱. احمدیان، ا.، قنبری، ا.، سیاه سر، ب. ۱۳۹۰. اثر تنش خشکی و مصرف انواع کود آلی و معدنی و بقایای آن‌ها بر عملکرد و اجزای عملکرد بابونه آلمانی (*Matricaria chamomilla* L.). بوم‌شناسی کشاورزی، ۳(۳)، ۳۸۳-۳۹۵.
۲. ابراهیم‌زاده، ا.، داوودی، ش.، حسن‌پور اقدم، م.ب.، رسولی، ف. ۱۴۰۰. مطالعه اثرات ۳ نوع کود مختلف (زیستی، آلی و کود کامل معدنی) روی برخی ویژگی‌های کیفی پس از برداشت خیار گلخانه‌ای رقم ناگین. دانش کشاورزی و تولید پایدار، ۳۱(۴)، ۲۷۱-۲۸۶.
۳. پرویزی زاده، ز.، قرینه، م.ح.، بخشنده، ع.م.، لطفی جلال‌آبادی، ا.، پاکدامن سردرود، ب. ۱۴۰۱. تغییر در ویژگی‌های رشدی، عملکردی و برخی متابولیت‌های ثانویه بابونه آلمانی (*Matricaria chamomilla* L. رقم پرسو (Presov) در پاسخ به کاربرد ژئولیت و قارچ (*Serendipita indica*). فصلنامه علوم محیطی، ۲۰(۲)، ۱۷۰-۱۵۵.
۴. جوادی ح.، صالحی شانجانی پ. ۱۴۰۲. تنوع صفات کاربیلوژیکی در جمعیت‌های مختلف بابونه آلمانی *Matricaria recutita* L. پژوهش‌های ژنتیک گیاهی، ۱۰(۲)، ۷۹-۹۰.
۵. جهان، م.، قلعه نویی، ش.، خاموشی، ا.، امیری، م.ب. ۱۳۹۴. بررسی ویژگی‌های اگرواکولوژیکی ریحان (*Ocimum basilicum* L.) تحت تأثیر کاربرد سوپرجاذب رطوبت، اسید هیومیک و دورهای آبیاری. علوم باغبانی، ۲۹(۲)، ۲۵۴-۲۴۰.
۶. جهان‌تغ، ط.، رئیسی، ع.، پیری، ح. ۱۴۰۳. بررسی تأثیر کودهای زیستی بر برخی ویژگی‌های کمی و کیفی گیاه گوار (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) در شهرستان ایرانشهر. به زراعی کشاورزی، ۲۶(۲)، ۴۷۱-۴۸۵.
۷. حیدرزاده، س.، احمدی، ف.، رحیمی، ا.، دولتی، ب. ۱۴۰۰. بررسی ویژگی‌های فیزیولوژیک بابونه آلمانی (*Matricaria chamomilla* L.) در شرایط تنش رطوبتی و منابع مختلف کودی، مجله تولید گیاهان زراعی، ۱۴(۲)، ۱۰۹-۱۲۶.

۸. ربیعی م.، عصری ی.، سفیدکن ف. ۱۴۰۳. ارزیابی تنوع اسانس و صفات مورفولوژیکی جمعیت های مختلف *Hymenocrater oxyodontus* Rech.f مرتع، ۱۸(۲)، ۳۰۵-۲۸۴.
۹. رحیمزاده، س.، سهرابی، ی.، حیدری، غ.ر.، عیوضی، ع.، حسینی، ط. ۱۳۹۰. تأثیر کاربرد کودهای شیمیایی و زیستی بر عملکرد و درصد اسانس گیاه دارویی بادرشبو (*Dracocephalum moldavica* L.). تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران، ۲۷(۱)، ۹۶-۸۱.
۱۰. رمودی، م.، جهانبانی، ف.، گلوی، م.، شمس الدین سعید، م. ۱۴۰۰. ارزیابی عملکرد گل و برخی ویژگی های کمی و کیفی گیاه دارویی بابونه (*Matricaria chamomilla* L.) در پاسخ به کود پتاسیم در شرایط تنش خشکی. پژوهش های تولید گیاهی، ۲۸(۴)، ۱۷۶-۱۵۹.
۱۱. زعفریان، ف.، اکبرپور، و.، حبیبی، م.، کاوه، م. ۱۳۹۸. تأثیر بیوچار و کودهای زیستی بر رنگیزه های فتوسنتزی، عملکرد و محتوای عناصر غذایی نعنای فلفلی (*Mentha piperita* L.). به زراعی کشاورزی، ۲۱(۴)، ۴۰۷-۴۲۲.
۱۲. شامحمدی، ن.، زارع، م.، اردوخانی، ک.، عارف، ف.، شرف زاده، ش. ۱۴۰۳. عملکرد ذرت دانه ای تحت تأثیر تنش کم آبی، کودهای زیستی و شیمیایی. علوم گیاهان زراعی ایران، ۵۵(۱)، ۲۳-۳۶.
۱۳. عسگریان، م.، امینی فرد، م.ح.، خیاط، م.، جهانی، م. ۱۳۹۸. بررسی تأثیر سطوح مختلف کود کامل NPK و اسید فولویک بر خصوصیات مورفولوژیکی، عملکرد و اجزا عملکرد گیاه دارویی ریحان (*Ocimum basilicum* L.). بوم شناسی کشاورزی، ۱۱(۴)، ۱۳۷۵-۱۳۸۸.
۱۴. گوهری، غ.، حسن پور اقدم، م.ب.، دادپور، م.ر.، شیردل، م. ۱۳۹۲. تأثیر محلول پاشی سطوح مختلف روی بر ویژگی های رشدی و عملکرد اسانس ریحان (*Ocimum basilicum* L.) در شرایط تنش شوری. روابط خاک و گیاه، ۴(۳)، ۱۵-۲۴.
۱۵. مظهری، م. ۱۴۰۲. بررسی اثر نوع بستر کشت بر برخی ویژگی های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاه دارویی بابونه آلمانی (*Matricaria chamomilla*) تحت تنش شوری، تحقیقات کاربردی خاک، ۱۱(۲)، ۱۴-۱۲۹.
۱۶. ملکوتی، م.ج.، ریاضی همدانی، ع.ح. ۱۳۷۱. کودها و حاصلخیزی خاک. مرکز نشر دانشگاهی، ۸۰۰ صفحه.
۱۷. ملکیان، م.، همتی، خ.، قاسم نژاد، ع.، شکری، ح.ا.، برزعلی، م.، دردی پور، ا. ۱۳۸۹. تأثیر بسترهای آلی کشت بر میزان کامازولن توده های بابونه آلمانی. همایش ملی گیاهان دارویی، دوره برگزاری ۱.

۱۸. مهرنیا، م.، حسینی، ز. ۱۴۰۲. شناسایی ترکیبات تشکیل دهنده اسانس گیاه دارویی زوفایی (*Thymbra spicata* L.) در استان لرستان. مجله پژوهشهای گیاهی (مجله زیست شناسی ایران) ۳۶(۲)، ۱۷۹-۱۹۴.
۱۹. میرسیدی، س.ک.، نصیری، ی.، مرشدلو، م.ر.، خلیلی، م. ۱۳۹۸. ارزیابی کاربرد کودهای آلی، شیمیایی، زیستی و اسیدهای آمینه بر صفات کمی و کیفی بابونه آلمانی (*Matricaria chamomilla* L.) در برداشت‌های مختلف. علوم باغبانی ایران، ۵۰(۴)، ۷۵۵-۷۶۷.
۲۰. میری، ح.، درزی، م.ت. ۱۳۹۷. تأثیر کود دامی و زیستی حل کننده فسفات بر رشد، عملکرد و کیفیت اسانس گیاه دارویی بادرشبی (*Dracocephalum moldavica* L.) در منطقه فیروزکوه. علوم گیاهان زراعی ایران، ۴۹(۲)، ۳۵-۴۵.
21. Fallahi, J., Koocheki, A., & Rezvani Moghaddam, P. (2010, April). Effects of biofertilizers on quantitative and qualitative yield of chamomile (*Matricaria recutita*) as a medicinal plant. In 6th Conference on Medicinal and Aromatic Plants of Southeast European Countries.
22. Hartwigsen, J.A. and Evans, M.R., 2000. Humic acid seed and substrate treatments promote seedling root development. HortScience, 35(7), pp.1231-1233.
23. Sharif, M., Khattak, R.A. and Sarir, M.S., 2002. Effect of different levels of lignitic coal derived humic acid on growth of maize plants. Communications in soil science and plant analysis, 33(19-20), pp.3567-3580.
24. Kuila, D. and Ghosh, S., 2022. Aspects, problems and utilization of Arbuscular Mycorrhizal (AM) application as bio-fertilizer in sustainable agriculture. Current Research in Microbial Sciences, 3, p.100107.
25. Sánchez Govín, E., Rodríguez González, H., Carballo Guerra, C. and Milanés Figueredo, M., 2005. Influence of organic fertilizers and biofertilizers on the quality of the medicinal species *Calendula officinalis* L. and *Matricaria recutita* L. Cuban Magazine of Medicinal Plants, 10(1), pp.0-0.
26. Souguir, M. and Hannachi, C., 2017. Response of sesame seedlings to different concentrations of humic acids or calcium nitrate at germination and early growth. Cercetari Agronomice In Moldova (Agronomic Research In Moldavia) 169, pp. 65-77.

پایش تغییرات سلامت پوشش گیاهی اراضی کشاورزی با استفاده از داده‌های سنجش از دور در استان البرز

رسول خوارزمی^{۱*} و میرناصر نویدی^۲

۱-استادیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، البرز، ایران. R.kharazmi@Areco.ac.ir

۲-دانشیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، البرز، ایران. N.navidi@Areco.ac.ir

«مقاله پژوهشی»

دریافت: ۱۴۰۴/۵/۷ و پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۱۶

چکیده

پایش سلامت پوشش گیاهی به‌ویژه در اراضی کشاورزی، نقش کلیدی در ارزیابی پایداری منابع زیستی، بهره‌وری زراعی و مقاومت به تغییرات اقلیمی دارد. در این پژوهش، با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره سنتینل-۲ (Sentinel-2) و شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده (NDVI)، روند تغییرات سلامت پوشش گیاهی در استان البرز طی سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۴ بررسی گردید و پردازش و تحلیل داده‌ها با استفاده از پلتفرم گوگل ارث انجین (Google Earth Engine) انجام شد. ابتدا تصاویر ماه‌های فروردین و اردیبهشت به‌عنوان بازه اوج رشد پوشش گیاهی انتخاب شدند. با اعمال ماسک‌گذاری ابر و سایه با استفاده از باند طبقه‌بندی صحنه (Scene Classification Layer)، داده‌ها خالص‌سازی شد و ترکیب میانه سالانه برای هر سال تولید گردید. سپس با استفاده از تحلیل رگرسیون خطی بر اساس سری‌زمانی NDVI، روند تغییرات برای هر پیکسل محاسبه و در پنج طبقه از کاهش شدید، کاهش کم، پایدار، افزایش کم، افزایش شدید طبقه‌بندی شد. نتایج نشان داد که بیش از ۸۰٪ از اراضی کشاورزی استان در طبقات "کاهش شدید" و "کاهش کم یا جزئی" قرار دارند که بیانگر افت قابل‌توجه در سلامت پوشش گیاهی طی دوره مطالعه است. تنها ۱۴٪ از اراضی روند افزایشی را تجربه کردند و ۶٪ نیز بدون تغییر باقی‌ماندند. این الگو با یافته‌های مطالعات مشابه در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان همخوانی دارد و نشان دهنده فشار شدید اقلیمی و مدیریتی بر منابع کشاورزی است. مناطق محدودی که بهبود در NDVI را نشان داده‌اند، بیانگر الگوهای موفق مدیریتی هستند که می‌توانند برای معکوس‌سازی روند تخریب در مقیاس وسیع‌تر به کار گرفته شوند. نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در حوزه برنامه‌ریزی کاربری اراضی، مدیریت منابع آب، و توسعه کشاورزی پایدار در استان البرز و مناطق مشابه استفاده شود. همچنین، تلفیق پایش ماهواره‌ای با بسترهای رایانش ابری، رویکردی مقیاس‌پذیر برای رصد پویایی‌های پوشش گیاهی در مناطقی با محدودیت داده فراهم می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: گوگل ارث انجین، شاخص پوشش گیاهی، تغییرات کاربری اراضی، رگرسیون خطی، ماهواره سنتینل

*-آدرس ایمیل نویسنده مسئول: R.kharazmi@areeo.ac.ir

استناد: خوارزمی، ر.، نویدی، م.، ۱۴۰۴. پایش تغییرات سلامت پوشش گیاهی اراضی کشاورزی با استفاده از داده‌های سنجش از دور در استان البرز. مقاله

پژوهشی، نشریه پژوهش‌های خاک، (۲) ۳۹، ص ۱۷۱-۱۸۸.

مقدمه

پایش سلامت پوشش گیاهی به عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی در مدیریت پایدار اکوسیستم‌ها، حفاظت از منابع طبیعی، و برنامه‌ریزی کشاورزی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (جیووس و همکاران، ۲۰۲۱). پوشش گیاهی به عنوان یک عامل دینامیک در چرخه‌های زیستی، آب و کربن نیازمند بررسی مداوم از نظر کمی و کیفی است تا بتوان تغییرات محیطی و اثرات آن‌ها بر اکوسیستم‌ها را شناسایی کرد (ژن و همکاران، ۲۰۲۰). استفاده از داده‌های سنجش از دور و شاخص‌های پوشش گیاهی، مانند شاخص تفاوت نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI)، شاخص پوشش گیاهی تعدیل شده خاک (SAVI)، و شاخص نسبت پوشش گیاهی (RVI)، امکان پایش گسترده و دقیق تغییرات پوشش گیاهی را در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف فراهم می‌سازد (نیک‌پور و همکاران، ۲۰۱۹؛ جیووس و همکاران، ۲۰۲۱). این شاخص‌ها با بهره‌گیری از ویژگی‌های طیفی گیاهان، مانند بازتاب در باندهای مادون قرمز نزدیک (NIR) و قرمز (Red)، اطلاعاتی در مورد میزان کلروفیل، زیست‌توده، و فعالیت فتوسنتزی گیاهان ارائه می‌دهند که به طور مستقیم با سلامت و رشد گیاهان مرتبط است (ژن و همکاران، ۲۰۲۰). اهمیت استفاده از داده‌های سنجش از دور در پایش سلامت پوشش گیاهی به دلیل توانایی آن در پوشش‌دهی مناطق وسیع، تکرارپذیری زمانی بالا، و کاهش هزینه‌های عملیاتی نسبت به روش‌های میدانی سنتی است (جیووس و همکاران، ۲۰۲۱). این فناوری به ویژه در پایش سلامت اراضی کشاورزی نقش حیاتی دارد، زیرا امکان شناسایی زودهنگام تنش‌های محیطی مانند خشکسالی، کمبود مواد مغذی، یا آفات را فراهم می‌کند، که می‌تواند به بهبود مدیریت منابع و افزایش بازده کشاورزی کمک کند (نیک‌پور و همکاران، ۲۰۱۹). علاوه بر این، داده‌های سنجش از دور در شناسایی تغییرات کاربری اراضی، مانند تبدیل اراضی کشاورزی به مناطق شهری یا صنعتی، کاربرد گسترده‌ای دارند. این داده‌ها با ارائه اطلاعات دقیق در مورد

تغییرات پوشش گیاهی، به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا اثرات منفی تغییر کاربری اراضی را شناسایی و راهکارهایی برای مدیریت پایدار منابع طبیعی ارائه دهند (خوارزمی و همکاران، ۱۴۰۳). توانایی پایش مستمر و شناسایی تغییرات در مناطق دورافتاده و صعب‌العبور، جایی که دسترسی میدانی محدود است، از دیگر مزایای این فناوری است که آن را به ابزاری ضروری برای مدیریت اراضی با کاربری-های مختلف تبدیل کرده است.

یکی از ابزارهای قدرتمند در تحلیل داده‌های سنجش از دور، پلتفرم گوگل ارث انجین (Google Earth Engine) است که امکان دسترسی سریع و کارآمد به مجموعه‌های بزرگ داده‌های ماهواره‌ای، مانند تصاویر Landsat و Sentinel، را فراهم می‌کند. این پلتفرم با ارائه ابزارهای پردازش ابری و الگوریتم‌های پیشرفته، به پژوهشگران و مدیران منابع طبیعی امکان می‌دهد تا شاخص‌های پوشش گیاهی مختلف را در مقیاس‌های گسترده و با سرعت بالا محاسبه و تحلیل کنند. گوگل ارث انجین به دلیل قابلیت یکپارچه‌سازی داده‌های چندمنبعی، سهولت در برنامه‌نویسی با زبان‌های جاوااسکریپت و پایتون، و امکان تحلیل‌های زمانی و مکانی پیچیده، به ابزاری کلیدی برای پایش تغییرات پوشش گیاهی، شناسایی تنش‌های محیطی، و ارزیابی اثرات تغییر کاربری اراضی تبدیل شده است. این پلتفرم به ویژه در مناطقی مانند ایران که نیاز به پایش مستمر و دقیق منابع طبیعی دارند، کارآمدی بالایی در تسهیل مدیریت پایدار اکوسیستم‌ها و کشاورزی ارائه می‌دهد (خوارزمی و همکاران، ۱۴۰۳). درنهایت، استفاده از این داده‌ها و شاخص‌ها به کاهش اثرات تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی بر اکوسیستم‌ها کمک می‌کند و به برنامه‌ریزی مؤثر برای حفاظت از اراضی کشاورزی و مدیریت پایدار کاربری اراضی یاری می‌رساند.

پایش سلامت پوشش گیاهی با استفاده از داده‌های سنجش از دور و شاخص‌های پوشش گیاهی موضوعی است که در سال‌های اخیر به دلیل پیشرفت‌های فناوری و افزایش نیاز به مدیریت پایدار منابع طبیعی، توجه زیادی را

سلامت محصولات کشاورزی در مقیاس محلی بسیار مؤثر است، اما نیاز به کالیبراسیون دقیق دارد.

در ایران، شبانی پور و همکاران (۱۳۹۸) تغییرات بلندمدت پوشش گیاهی استان کردستان را با استفاده از تصاویر سنجنده Modis و شاخص NDVI مورد واکاوی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که روش بکار گرفته شده به خوبی روند تغییرات پوشش گیاهی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. پژوهش‌های جهانی اخیر بر استفاده از شاخص‌های جدیدتر و پیشرفته‌تر مانند شاخص تقویت شده پوشش گیاهی (EVI) و شاخص تفاوت نرمال شده آب (NDWI) متمرکز شده‌اند. به عنوان مثال، پارک و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از EVI و داده‌های MODIS، تغییرات فصلی فعالیت فتوسنتزی در اکوسیستم‌های شمالی را بررسی کردند و نشان دادند که این شاخص نسبت به NDVI در مناطق با پوشش گیاهی متراکم حساس‌تر است. علاوه بر این، نوتاماچوت و همکاران (۲۰۲۲) با ترکیب داده‌های راداری Sentinel-1 و شاخص‌های نوری مانند NDVI، به ارزیابی زیست توده جنگلی پرداختند و نشان دادند که این رویکرد دقت مدل سازی را بهبود می‌بخشد.

از سوی دیگر، مطالعات نشان داده‌اند که انتخاب شاخص مناسب به نوع کاربرد و شرایط محیطی بستگی دارد. به عنوان مثال، ماکسول و همکاران (۲۰۱۷) با بررسی شاخص‌های مختلف، نشان دادند که OSAVI در مقایسه با NDVI در مناطق با پوشش خاک بالا دقت بیشتری در پایش سلامت پوشش گیاهی دارد. این پژوهش‌ها به طور کلی نشان‌دهنده نقش حیاتی داده‌های سنجش از دور و شاخص‌های پوشش گیاهی در مدیریت پایدار منابع طبیعی و کشاورزی هستند و بر نیاز به توسعه روش‌های جدید و یکپارچه برای بهبود دقت پایش تأکید دارند.

به خود جلب کرده است. باناری و همکاران (۱۹۹۵) در مطالعه‌ای کلاسیک، شاخص‌های مختلف پوشش گیاهی مانند SAVI، NDVI و RVI را بررسی کرده و نشان دادند که این شاخص‌ها ابزارهای مؤثری برای ارزیابی سلامت پوشش گیاهی هستند. این مطالعه بر سادگی و حساسیت بالای NDVI به تغییرات زیست توده و کلروفیل تأکید کرد، هرچند محدودیت‌هایی مانند تأثیر شرایط خاک و پوشش ابر را نیز مورد توجه قرار داد. بارت و همکاران (۱۹۹۱) نیز پتانسیل‌ها و محدودیت‌های شاخص‌های پوشش گیاهی را در ارزیابی شاخص سطح برگ (LAI) و جذب تابش فعال فتوسنتزی (APAR) بررسی کردند و بر اهمیت انتخاب شاخص مناسب بر اساس نوع پوشش گیاهی و شرایط محیطی تأکید داشتند.

مطالعات جدیدتر با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین مانند تصاویر ماهواره‌ای با رزولوشن بالا و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، دقت پایش سلامت پوشش گیاهی را بهبود بخشیده‌اند. ژانگ و همکاران (۲۰۲۰) با ترکیب داده‌های چند طیفی از ماهواره‌های Sentinel-2 و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، روشی نوین برای پیش‌بینی تنش‌های محیطی مانند خشک سالی و آفات ارائه کردند که دقت بالایی در شناسایی زود هنگام این تنش‌ها دارد. این مطالعه نشان داد که ترکیب داده‌های چند طیفی و الگوریتم‌های هوشمند می‌تواند محدودیت‌های شاخص‌های سنتی مانند NDVI را کاهش دهد. به طور مشابه، وست و همکاران (۲۰۱۹) از شاخص سلامت پوشش گیاهی (VHI) برای پایش تنش‌های آبی و دمایی در کشاورزی استفاده کردند و نشان دادند که ترکیب شاخص‌های NDVI و دمای سطح زمین (LST) می‌تواند به شناسایی دقیق‌تر شرایط خشک سالی کمک کند.

در زمینه کشاورزی دقیق، پژوهش‌های اخیر بر استفاده از پهپادها و تصاویر ماهواره‌ای با رزولوشن بالا برای پایش سلامت محصولات متمرکز کرده‌اند. به عنوان مثال، دنگ و همکاران (۲۰۱۷) با مقایسه دوربین‌های مختلف چند طیفی در پهپادها، نشان دادند که NDVI برای ارزیابی

ضرورت پایش سلامت پوشش گیاهی و ارتباط آن با تغییر کاربری اراضی کشاورزی

تغییر کاربری اراضی کشاورزی، به‌ویژه تبدیل اراضی زراعی به مناطق شهری یا صنعتی، یکی از چالش‌های اصلی در مدیریت پایدار منابع طبیعی است که اثرات منفی قابل‌توجهی بر سلامت پوشش گیاهی و امنیت غذایی دارد. پایش سلامت پوشش گیاهی با استفاده از داده‌های سنجنش از دور و شاخص‌های پوشش گیاهی نقش مهمی در شناسایی و مدیریت این تغییرات ایفا می‌کند. این فناوری امکان ردیابی تغییرات در سلامت پوشش گیاهی را در مقیاس‌های گسترده فراهم می‌سازد و به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا اثرات منفی تغییر کاربری اراضی را ارزیابی کرده و راهکارهایی برای کاهش پیامدهای منفی آن ارائه دهند (هیو و همکاران، ۲۰۲۳).

یکی از دلایل اصلی ضرورت پایش سلامت پوشش گیاهی، ارتباط مستقیم آن با پایداری اکوسیستم‌های کشاورزی است. کاهش سلامت پوشش گیاهی، که اغلب با کاهش شاخص‌هایی مانند NDVI یا VHI همراه است، می‌تواند نشانه‌ای از تخریب اراضی کشاورزی به دلیل فعالیت‌های انسانی مانند شهرسازی یا بهره‌برداری ناپایدار باشد. به‌عنوان مثال، فو و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از داده‌های Landsat و شاخص NDVI، تأثیر گسترش مناطق شهری بر کاهش پوشش گیاهی در مناطق کشاورزی را بررسی کردند و نشان دادند که این تغییرات منجر به کاهش قابل‌توجه زیست‌توده و ظرفیت تولید محصولات کشاورزی شده است. این مطالعه بر اهمیت پایش مستمر برای شناسایی زودهنگام تغییرات کاربری اراضی و برنامه‌ریزی برای حفظ اراضی کشاورزی تأکید دارد.

علاوه بر این، پایش سلامت پوشش گیاهی می‌تواند به شناسایی تنش‌های محیطی مرتبط با تغییر کاربری اراضی، مانند کاهش دسترسی به آب یا تخریب خاک، کمک کند. کومار و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از شاخص NDWI و داده‌های Sentinel-2، نشان دادند که تبدیل اراضی کشاورزی به کاربری‌های غیر کشاورزی در

مناطق خشک منجر به کاهش رطوبت خاک و افزایش تنش‌های آبی در پوشش گیاهی شده است. این یافته‌ها بر ضرورت استفاده از شاخص‌های حساس به آب مانند NDWI برای پایش اثرات تغییر کاربری اراضی بر سلامت پوشش گیاهی تأکید دارند. به‌طور مشابه، چن و همکاران (۲۰۲۳) با ترکیب داده‌های راداری Sentinel-1 و شاخص‌های نوری، نشان دادند که تغییر کاربری اراضی کشاورزی به مناطق صنعتی باعث کاهش تنوع زیستی و سلامت پوشش گیاهی شده و اثرات منفی بر خدمات اکوسیستمی مانند تنظیم آب‌و‌خاک داشته است.

در ایران، تغییر کاربری اراضی کشاورزی به دلیل فشارهای شهری و صنعتی یکی از مسائل مهم زیست‌محیطی است. نیک‌پور و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که کاهش مقادیر NDVI در استان ایلام با تبدیل اراضی کشاورزی به کاربری‌های غیر کشاورزی مرتبط است، که این امر به کاهش حاصلخیزی خاک و ظرفیت تولید کشاورزی منجر شده است. این مطالعه بر اهمیت پایش مستمر پوشش گیاهی برای جلوگیری از تخریب بیشتر اراضی تأکید دارد. همچنین، احمدی و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از داده‌های Sentinel-2 و شاخص EVI، اثرات گسترش مناطق شهری بر سلامت پوشش گیاهی در حاشیه شهرهای بزرگ ایران را بررسی کردند و نشان دادند که این تغییرات باعث کاهش فعالیت فتوسنتزی و افزایش تنش‌های محیطی در اراضی کشاورزی شده است.

از سوی دیگر، پایش سلامت پوشش گیاهی می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای ارزیابی اثربخشی سیاست‌های مدیریت اراضی استفاده شود. به‌عنوان مثال، لیو و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از داده‌های MODIS و شاخص VHI، تأثیر سیاست‌های حفاظت از اراضی کشاورزی را در برابر تغییر کاربری بررسی کردند و نشان دادند که پایش مستمر سلامت پوشش گیاهی می‌تواند به شناسایی مناطق در معرض خطر و اولویت‌بندی اقدامات حفاظتی کمک کند. این مطالعه نشان داد که شاخص‌های پوشش گیاهی می‌توانند

به‌عنوان معیاری برای ارزیابی پایداری اراضی کشاورزی در برابر فشارهای ناشی از تغییر کاربری عمل کنند.

به‌طورکلی، پایش سلامت پوشش گیاهی نه تنها به شناسایی اثرات منفی تغییر کاربری اراضی کشاورزی کمک می‌کند، بلکه در برنامه‌ریزی برای استفاده پایدار از منابع طبیعی نقش کلیدی دارد. استفاده از فناوری‌های سنجش از دور و شاخص‌های پیشرفته مانند NDVI امکان ارائه داده‌های دقیق و به‌موقع را فراهم می‌کند که برای تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر شواهد در مدیریت اراضی کشاورزی ضروری است. این رویکرد به کاهش اثرات منفی تغییر کاربری اراضی، حفظ امنیت غذایی، و تقویت پایداری اکوسیستم‌های کشاورزی کمک می‌کند (پاندى و شارما، ۲۰۲۱).

ضرورت پایش سلامت پوشش گیاهی در استان البرز با توجه به اهمیت کشاورزی و موقعیت ژئوپلیتیکی

استان البرز با برخورداری از اراضی حاصلخیز و تنوع اقلیمی، نقش مهمی در تولید محصولات کشاورزی و تأمین امنیت غذایی ایفا می‌کند. با این حال، نزدیکی به پایتخت و موقعیت البرز به‌عنوان یک مرکز اقتصادی و صنعتی، آن را در معرض فشارهای فزاینده‌ای برای توسعه زیرساخت‌های شهری، صنعتی و حمل‌ونقل قرار داده است. این عوامل باعث شده‌اند که اراضی کشاورزی این استان در معرض تهدیدات ناشی از تغییر کاربری و توسعه غیر پایدار قرار گیرند، که ضرورت پایش سلامت پوشش گیاهی را در این منطقه دوچندان می‌کند.

اهمیت کشاورزی در البرز به دلیل تولید محصولات زراعی و باغی متنوع و تأمین نیازهای غذایی منطقه و حتی پایتخت، غیرقابل انکار است. با این وجود، فقدان مطالعات جامع و دقیق در زمینه پایش سلامت پوشش گیاهی در البرز، شکاف قابل توجهی در درک وضعیت کنونی این اراضی و شناسایی تهدیدات بالقوه ایجاد کرده است. انجام چنین مطالعاتی با استفاده از

داده‌های سنجش از دور می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در مورد وضعیت سلامت پوشش گیاهی، تنش‌های و روندهای احتمالی تخریب اراضی فراهم کند که این اطلاعات برای برنامه‌ریزی حفاظت از اراضی کشاورزی و مدیریت پایدار منابع طبیعی ضروری هستند.

علاوه بر این، کمبود مطالعات پیشین در زمینه پایش سلامت پوشش گیاهی در البرز خود به‌عنوان یک ضرورت برای انجام چنین پژوهش‌هایی مطرح است. نبود داده‌های کافی در مورد وضعیت پوشش گیاهی این استان، توانایی تصمیم‌گیرندگان را برای مقابله با چالش‌های زیست‌محیطی و برنامه‌ریزی برای توسعه پایدار محدود کرده است. به‌طورکلی، پایش سلامت پوشش گیاهی در استان البرز به دلیل اهمیت کشاورزی این منطقه یک ضرورت است. این نوع پایش نه تنها به حفظ اراضی کشاورزی و تقویت امنیت غذایی کمک می‌کند، بلکه داده‌های لازم برای مدیریت پایدار منابع طبیعی و کاهش اثرات منفی توسعه شهری و صنعتی را فراهم می‌سازد. انجام مطالعات جامع در این زمینه می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای برای تدوین سیاست‌های حفاظتی و برنامه‌ریزی توسعه پایدار در البرز عمل کند.

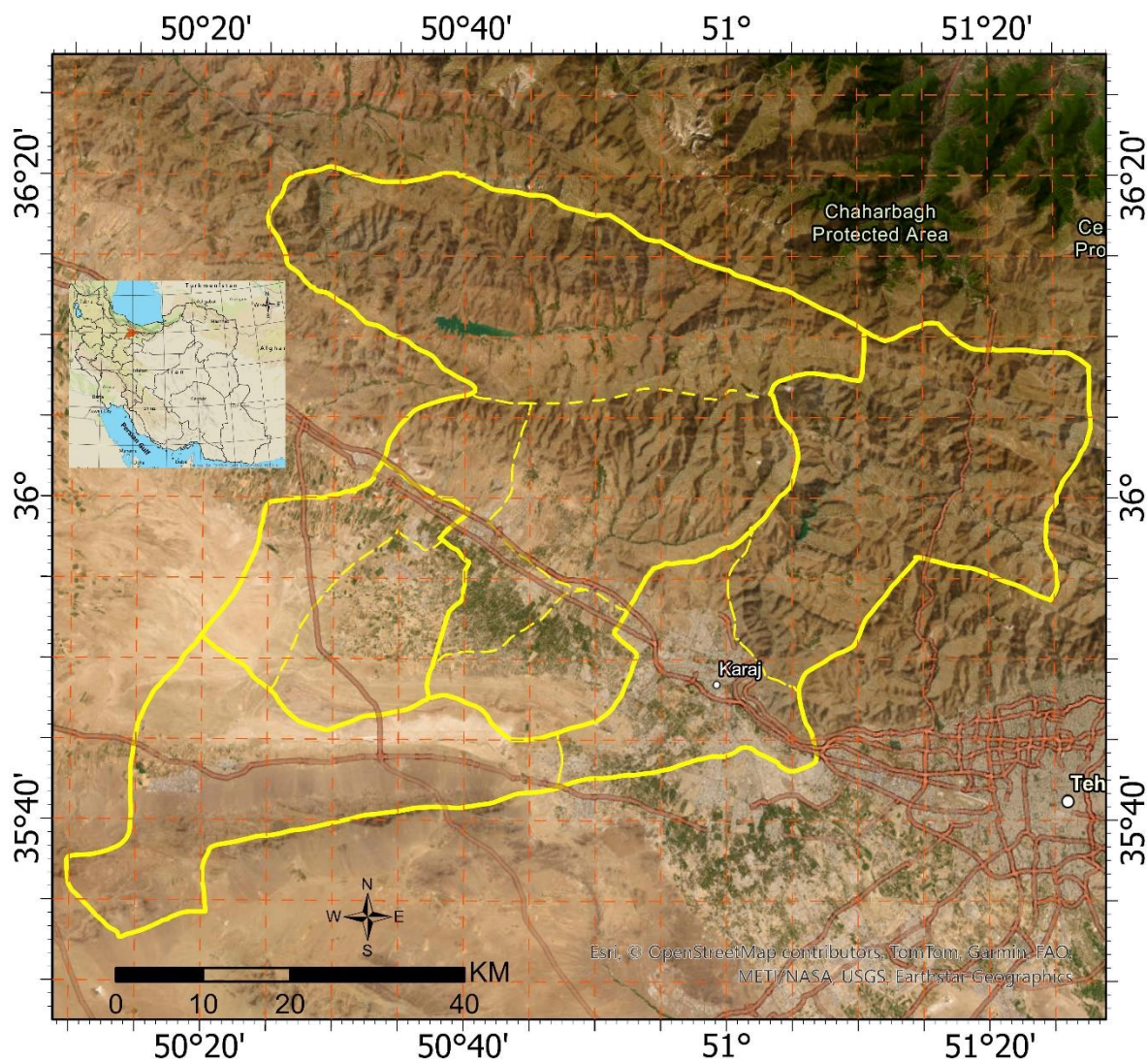
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان البرز، با گستره‌ای حدود ۵۱۲۳ کیلومترمربع، در بخش جنوبی رشته‌کوه البرز جای گرفته است. بخش‌های شمالی این استان عمدتاً کوهستانی هستند، در حالی که مناطق جنوبی آن به دشت‌های مرکزی فلات ایران تعلق دارند (شکل ۱). این استان به دلیل قرارگیری در مسیر ارتباطی میان قطب‌های صنعتی عمده کشور، از موقعیت جغرافیایی ویژه‌ای برخوردار بوده و همین موضوع موجب مهاجرت و افزایش جمعیت از مناطق مختلف کشور به آن شده است. شرایط اقلیمی در البرز از نواحی جنوبی با اقلیم خشک و نیمه‌خشک آغاز می‌شود و هر چه به سمت

اکولوژیکی استان نشان می‌دهد که حداقل ۶۳ هزار هکتار از اراضی برای کشاورزی آبی مناسب‌اند، و بخش قابل توجهی از اراضی استان پتانسیل مناسبی برای توسعه باغات و کشاورزی دارد (بهرامی و همکاران، ۲۰۲۴).

شمال پیش می‌رویم، به آب‌وهوای مرطوب تا بسیار مرطوب تغییر می‌یابد (خوارزمی و همکاران، ۱۴۰۳). مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که حدود ۶۲ هزار هکتار از اراضی این استان تحت کشت است، که بخش عمده‌ای از آن در دشت‌هایی مانند هشتگرد قرار دارد و بهره‌برداری گسترده از آب‌های سطحی و زیرزمینی را شامل می‌شود (رضایی و همکاران، ۲۰۲۱). همچنین، ارزیابی ظرفیت



شکل ۱- موقعیت مکانی محدوده مورد مطالعه

Sentinel-2 و پلتفرم گوگل ارث انجین (Google Earth Engine)، امکان تحلیل دقیق و گسترده تغییرات پوشش گیاهی را در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف فراهم می‌کند. در این پژوهش، فرآیند محاسبه شاخص تفاوت نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI) برای پایش

روش کار

پایش سلامت پوشش گیاهی یکی از روش‌های کلیدی برای ارزیابی وضعیت اکوسیستم‌ها، مدیریت پایدار منابع طبیعی، و برنامه‌ریزی کشاورزی است. استفاده از داده‌های سنجش از دور، به‌ویژه تصاویر ماهواره‌ای

پیش‌پردازش داده‌ها و ماسک ابر

یکی از مراحل کلیدی در پیش‌پردازش داده‌های ماهواره‌ای برای استخراج شاخص‌های طیفی نظیر NDVI، حذف پیکسل‌های مخدوش ناشی از حضور ابر، سایه ابر، برف، مه و سایر عوامل جوی یا سنسوری است. برای اطمینان از کیفیت داده‌ها و حذف تصاویر باکیفیت پایین، از دو فیلتر مهم استفاده شده است. در ابتدا تصاویر با درصد پوشش ابر کمتر از ۲۰٪ فیلتر شدند تا تأثیر ابرها بر داده‌های طیفی کاهش یابد (لوویس و همکاران، ۲۰۱۹). سپس، به منظور افزایش دقت استخراج شاخص‌های طیفی و کاهش تأثیر خطاهای ناشی از شرایط اتمسفری یا پیکسل‌های غیر معتبر، از باند طبقه‌بندی صحنه (Scene Classification Layer) یا SCL موجود در داده‌های Sentinel-2 سطح بازتابی Level-2A استفاده شد. این باند که توسط الگوریتم Sen2Cor (ریانی و همکاران، ۲۰۲۱) در فرایند پیش‌پردازش تولید می‌شود، هر پیکسل را بر اساس نوع سطح پوششی آن به یکی از دوازده کلاس مجزا طبقه‌بندی می‌کند (جدول یک). کلاس‌های موجود شامل پوشش گیاهی متراکم، خاک برهنه، مناطق آبی، مناطق ساخته‌شده، برف یا یخ، ابرها با احتمال متوسط و بالا، سایه ابر، پیکسل‌های معیوب و سایر موارد هستند (زکول و همکاران، ۲۰۲۱).

سلامت پوشش گیاهی در استان البرز طی بازه زمانی ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۴ (ماه‌های فروردین و اردیبهشت) با استفاده از داده‌های Sentinel-2 و پلتفرم گوگل ارث انجین را تشریح می‌کند.

تصاویر استفاده‌شده در این پژوهش، متعلق به ماهواره Sentinel-2 است. این ماهواره، مأموریتی از برنامه کوپرنیک اتحادیه اروپا، تصاویری با قدرت تفکیک مکانی بالا (۱۰ تا ۶۰ متر) و قدرت تفکیک زمانی ۵ روز ارائه می‌دهد که برای پایش پوشش گیاهی در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای بسیار مناسب است. محصول انتخاب‌شده در این تحلیل، مجموعه "S2_SR_HARMONIZED" است که داده‌های سطح بازتابی (Level-2A) تصحیح‌شده اتمسفری را با وضوح مکانی بالا فراهم می‌کند (خوارزمی و همکاران، ۱۴۰۳). باندهای طیفی قرمز (باند ۴) و مادون قرمز نزدیک (باند ۸) این ماهواره برای محاسبه NDVI استفاده می‌شوند، زیرا این باندها به ترتیب نشان‌دهنده جذب کلروفیل و بازتاب قوی پوشش گیاهی سالم هستند. بازه زمانی انتخاب‌شده (فروردین و اردیبهشت، ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۴) به دلیل اوج فعالیت فتوسنتزی پوشش گیاهی در بهار و کاهش تأثیر پوشش ابر در این ماه‌ها در منطقه البرز انتخاب‌شده است. این بازه زمانی امکان تحلیل روندهای بلندمدت سلامت پوشش گیاهی را فراهم می‌کند و بهترین بازتاب از سلامت پوشش گیاهی در آغاز فصل رویش را ارائه می‌دهند.

جدول ۱- طبقه‌بندی پیکسل‌ها در الگوریتم Scene Classification Layer

شرح کد	SCL کد
بدون داده (No Data)	۰
پوشش آبی (Saturated or Dark Features)	۱
آب (Water)	۲
ابر برف‌گونه (Cloud shadows over snow)	۳
پوشش گیاهی (Vegetation)	۴
خاک لخت (Bare soil)	۵
مناطق ساخته‌شده (Built-up)	۶
سایه ابر (Cloud shadow)	۷
ابر متوسط (Cloud medium probability)	۸
ابر زیاد (Cloud high probability)	۹
ابر سیروس (Thin cirrus)	۱۰
برف یا یخ (Snow or ice)	۱۱

تأثیر ابرها، سایه ابر، ابر پُرسان (cirrus) و پیکسل‌های اشباع یا معیوب قرار دارند؛ از تصاویر حذف شدند. این کار با اعمال ماسک منطقی به داده‌های تصویری در محیط Google Earth Engine انجام شد. به این ترتیب، تنها پیکسل‌های باکیفیت مناسب که احتمال بازتاب واقعی پوشش گیاهی دارند، در روند تحلیل وارد شدند.

لازم به توضیح است که استفاده از باند SCL در فاز پیش‌پردازش، از چند جهت اهمیت دارد. اولاً، این فرایند به‌طور مؤثری از ورود نویزهای شدید ناشی از پوشش ابری یا اشباع سنسورها به فرایند محاسبه NDVI جلوگیری می‌کند. ثانیاً، باعث می‌شود سری زمانی حاصل از این شاخص از همگنی و یکپارچگی بیشتری برخوردار باشد که در تحلیل‌های آماری بلندمدت، نظیر رگرسیون خطی پیکسلی، حیاتی است (گاندر و همکاران، ۲۰۲۰). درنهایت، این اقدام دقت مدل‌های تغییر روند را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد، زیرا پیکسل‌های غیرواقعی باعث خطای برازش و تفسیرهای نادرست از شیب و روند تغییرات می‌شوند.

در برخی مطالعات، بسته به هدف تحقیق، کلاس‌های دیگری مانند خاک برهنه یا مناطق ساخته‌شده نیز از داده‌ها حذف می‌شوند تا فقط پوشش گیاهی خالص مورد تحلیل قرار گیرد. در این تحقیق، با توجه به تمرکز بر

برای حذف پیکسل‌های نامعتبر، از مجموعه‌ای از کلاس‌های نامطلوب شامل سایه ابر (کد ۷)، ابر با احتمال متوسط (کد ۸)، ابر با احتمال زیاد (کد ۹)، ابر نازک یا سیروس (کد ۱۰) و پیکسل‌های اشباع یا معیوب (کد ۱۱) صرف‌نظر شد. به این منظور، ماسک منطقی $M(x,y)$ به‌صورت زیر تعریف شد:

رابطه (۱)

$$M(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{if } SCL(x,y) \in \{4, 5, 6\} \\ 0 & \text{if } SCL(x,y) \in \{7, 8, 9, 10, 11\} \end{cases}$$

در این فرمول، $SCL(x,y)$ مقدار باند SCL در مختصات مکانی پیکسل و $M(x,y)$ ماسک نهایی است. تنها پیکسل‌هایی با مقدار ماسک برابر با ۱ (یعنی معتبر) در تحلیل‌های بعدی نظیر محاسبه NDVI و تحلیل روند وارد شدند.

لازم به توضیح است که کلاس‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب شامل پوشش‌های آبی، منابع آب و ابر برف‌گونه در باند طبقه‌بندی صحنه (SCL) تصاویر Sentinel-2 درواقع به انواع پوشش سطح زمین مربوط می‌شوند و فاقد پوشش گیاهی هستند که در تحلیل NDVI کنار گذاشته می‌شوند (گاسکون و همکاران، ۲۰۱۷).

با توجه به ماهیت شاخص NDVI و حساسیت بالای آن به بازتاب‌های غیرواقعی، پیکسل‌هایی که تحت

مذکور با استفاده از تابع (ee.Reducer.linearFit) در محیط Google Earth Engine پیاده‌سازی شد که برای هر پیکسل دو پارامتر مهم را استخراج می‌کند: شیب (slope) و عرض از مبدأ (intercept).

مدل خطی به صورت زیر تعریف می‌شود:

رابطه (۳)

$$NDVI_t = \beta_0 + \beta_1 \times t + \varepsilon$$

که در آن، $NDVI_t$ مقدار شاخص NDVI در سال t ، β_0 عرض از مبدأ، β_1 شیب خط و ε جمله خطای تصادفی است. پارامتر شیب (β_1) به عنوان شاخصی کلیدی برای ارزیابی روند تغییرات پوشش گیاهی مورد استفاده قرار گرفت. مقادیر مثبت شیب بیانگر روند افزایشی در سلامت پوشش گیاهی در بازه زمانی مورد بررسی هستند، در حالی که مقادیر منفی نشان‌دهنده کاهش پوشش گیاهی، ناشی از خشکسالی، تغییرات کاربری زمین یا تخریب اکولوژیکی است. مقادیر نزدیک به صفر نیز بیانگر ثبات نسبی در وضعیت پوشش گیاهی در طول زمان می‌باشند.

مزیت اصلی رگرسیون خطی در این تحلیل، سادگی در پیاده‌سازی و تفسیر آسان نتایج است. این روش به صورت پیکسلی اجرا شده و امکان بررسی دقیق تغییرات مکانی را نیز فراهم می‌سازد. از سوی دیگر، با استفاده از تصاویر میانگین‌گیری شده (میان‌گیری) در ماه آوریل و حذف پیکسل‌های دارای نویز، ابری یا معیوب، دقت این تحلیل بهبود یافته است و نتایج آن با واقعیت پوشش زمین همخوانی بسیار بالایی دارد.

برای طبقه‌بندی بهتر نتایج حاصل از شیب NDVI، مقادیر عددی به پنج کلاس معنایی تقسیم شدند (جدول دو). این طبقات بر اساس مطالعات انجام‌شده پیشین (لان و دونگ، ۲۰۲۲) و همچنین، شدت و جهت روند تغییرات طراحی گردیده‌اند و امکان تولید نقشه‌های موضوعی از وضعیت پویایی پوشش گیاهی را فراهم می‌سازند. نقشه نهایی حاصل از طبقه‌بندی شیب NDVI امکان شناسایی سریع مناطق در حال تخریب یا بهبود

ارزیابی سلامت پوشش گیاهی کشاورزی، حذف پیکسل‌های ابری و معیوب کافی تشخیص داده شد و سایر کلاس‌ها، از جمله خاک، در تحلیل باقی ماندند تا امکان بررسی تحولات حاشیه مزارع نیز فراهم گردد.

محاسبه شاخص NDVI

شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI) با

استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

رابطه (۲)

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

که در آن NIR بازتاب باند مادون قرمز نزدیک (باند ۸) و Red بازتاب باند قرمز (باند ۴) است. این شاخص به دلیل حساسیت بالا به تغییرات کلروفیل، زیست‌توده، و فعالیت فتوسنتزی، به عنوان یکی از پرکاربردترین شاخص‌ها برای پایش سلامت پوشش گیاهی شناخته می‌شود (ژیانگ و همکاران، ۲۰۲۱).

در این پژوهش، برای هر سال (۱۳۹۶ تا ۱۴۰۴)، تصاویر Sentinel-2 در بازه زمانی آپریل تا می انتخاب شد و در نهایت، برای تولید یک تصویر ترکیبی فاقد پوشش ابری در سطح کل منطقه مطالعه، از عملگر میانه (Median) بهره گرفته شد. استفاده از این روش نه تنها موجب کاهش اثرات پیکسل‌های پوشیده از ابر می‌شود، بلکه با حذف مقادیر پرت ناشی از پدیده‌هایی مانند سایه، مه یا روشنایی‌های غیرعادی، به بهبود کیفیت و همگنی تصویر نهایی کمک می‌کند (خوارزمی و همکاران، ۱۴۰۳).

تحلیل روند سری زمانی NDVI با استفاده از

رگرسیون خطی

به منظور بررسی روند تغییرات بلندمدت در پوشش گیاهی استان البرز طی دوره زمانی ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۴، از مدل رگرسیون خطی پیکسلی استفاده شد. در این روش، به ازای هر پیکسل، شاخص NDVI محاسبه شده برای ماه‌های تعیین‌شده هر سال به عنوان متغیر وابسته و سال به عنوان متغیر مستقل در یک مدل خطی قرار گرفت. تحلیل

اکولوژیکی را برای مدیریت منابع طبیعی، کشاورزی و برنامه‌ریزی کاربری زمین فراهم می‌سازد.

جدول ۲- تغییرات شیب شاخص NDVI در طول زمان

Class	Slope Range (per year) بازه شیب (در سال)	Interpretation تفسیر
0	< -0.02	Strong Decrease کاهش شدید
1	-0.02 to -0.005	Slight Decrease کاهش جزئی
2	-0.005 to +0.005	Stable پایدار
3	+0.005 to +0.02	Slight Increase افزایش جزئی
4	> +0.02	Strong Increase افزایش شدید

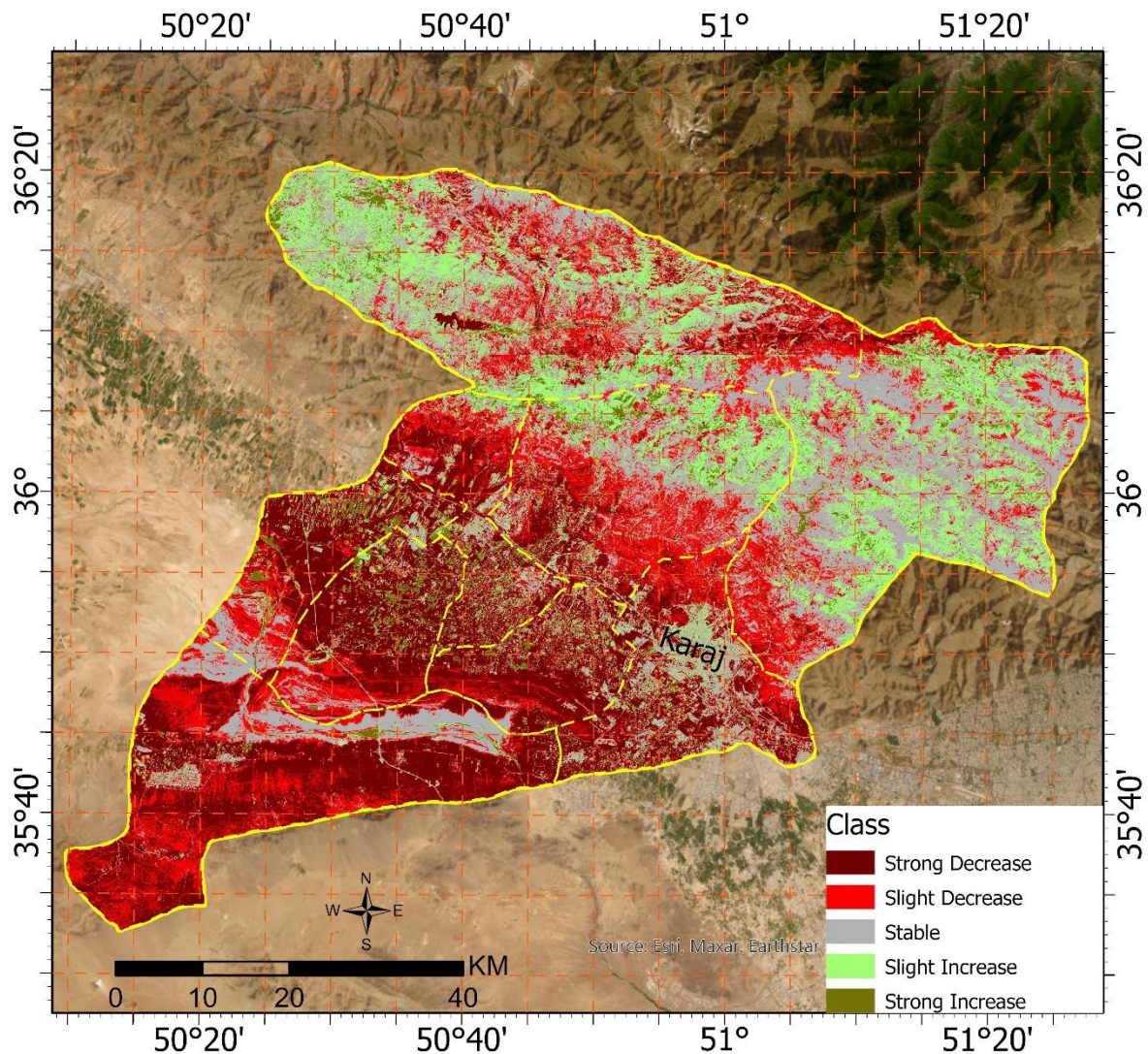
برنامه پنجم پوشش مشاهدات زمینی (EOEP-5) تولید شده است (زانگا و همکاران، ۲۰۲۱).

نتایج

با توجه به تحلیل‌های انجام‌شده بر پایه شاخص NDVI و استفاده از سری‌زمانی تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 طی سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۴، در این بخش به بررسی روند تغییرات سلامت پوشش گیاهی در استان البرز پرداخته می‌شود. نتایج ارائه‌شده بر اساس مدل رگرسیون خطی پیکسلی و طبقه‌بندی شیب تغییرات NDVI، تصویری دقیق از مناطق با افزایش، کاهش یا ثبات در وضعیت زیستی پوشش گیاهی فراهم می‌کند (شکل ۲).

بررسی سلامت گیاهی در اراضی کشاورزی

در این مرحله با توجه به اهمیت سلامت شرایط گیاهی به‌منظور پایش روند تخریب، لایه اراضی کشاورزی استان البرز (شامل اراضی زراعی آبی و دیم، اراضی آیش و باغات) با استفاده از پروداکت با دقت ده متر پوشش‌زمین که توسط آژانس فضایی اروپا (ESA) تهیه و منتشر شده است، استخراج گردید. این نقشه بر پایه داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-1 و Sentinel-2 تهیه‌شده است. این محصول شامل ۱۱ طبقه پوشش زمین بوده و در چارچوب پروژه World Cover آژانس فضایی اروپا و به‌عنوان بخشی از



شکل ۲- نقشه پایش سلامت پوشش گیاهی استان البرز بین سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۴ خورشیدی

واقع شده‌اند و به رنگ قرمز تیره در نقشه مشخص هستند. چنین روندی می‌تواند نشانه‌ای از تخریب پوشش گیاهی، تغییرات کاربری نامطلوب یا کاهش پایداری کشاورزی در این مناطق باشد.

از سوی دیگر، طبقه پایدار (Stable) با ۱۳۸۰/۶ کیلومترمربع معادل تقریباً ۲۷ درصد مساحت کل، نشان‌دهنده مناطقی است که در طی این نه سال، تغییر محسوسی در شاخص NDVI آن‌ها مشاهده نشده است. این نواحی (به رنگ خاکستری) معمولاً شامل زمین‌های بایر ثابت، مناطق کوهستانی و سنگلاخی، مناطق شهری پایدار یا مراتعی با نوسانات جزئی پوشش گیاهی هستند.

نتایج تحلیل سری‌زمانی شاخص NDVI استفاده از مدل رگرسیون خطی پیکسلی در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۵، تغییرات پوشش گیاهی در محدوده استان البرز را در پنج کلاس اصلی دسته‌بندی کرد: «کاهش شدید»، «کاهش جزئی»، «پایدار»، «افزایش جزئی» و «افزایش شدید». بررسی آماری این طبقات نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از استان طی این دوره با روند منفی در سلامت پوشش گیاهی مواجه بوده است.

بیشترین مساحت متعلق به کلاس کاهش شدید (Strong Decrease) با ۱۴۹۴/۵ کیلومترمربع است که حدود ۳۰ درصد از کل محدوده مورد مطالعه را دربر می‌گیرد. این نواحی عمدتاً در بخش‌های جنوبی و مرکزی

بارندگی‌های محلی در این فصل از سال در برخی نواحی باشد.

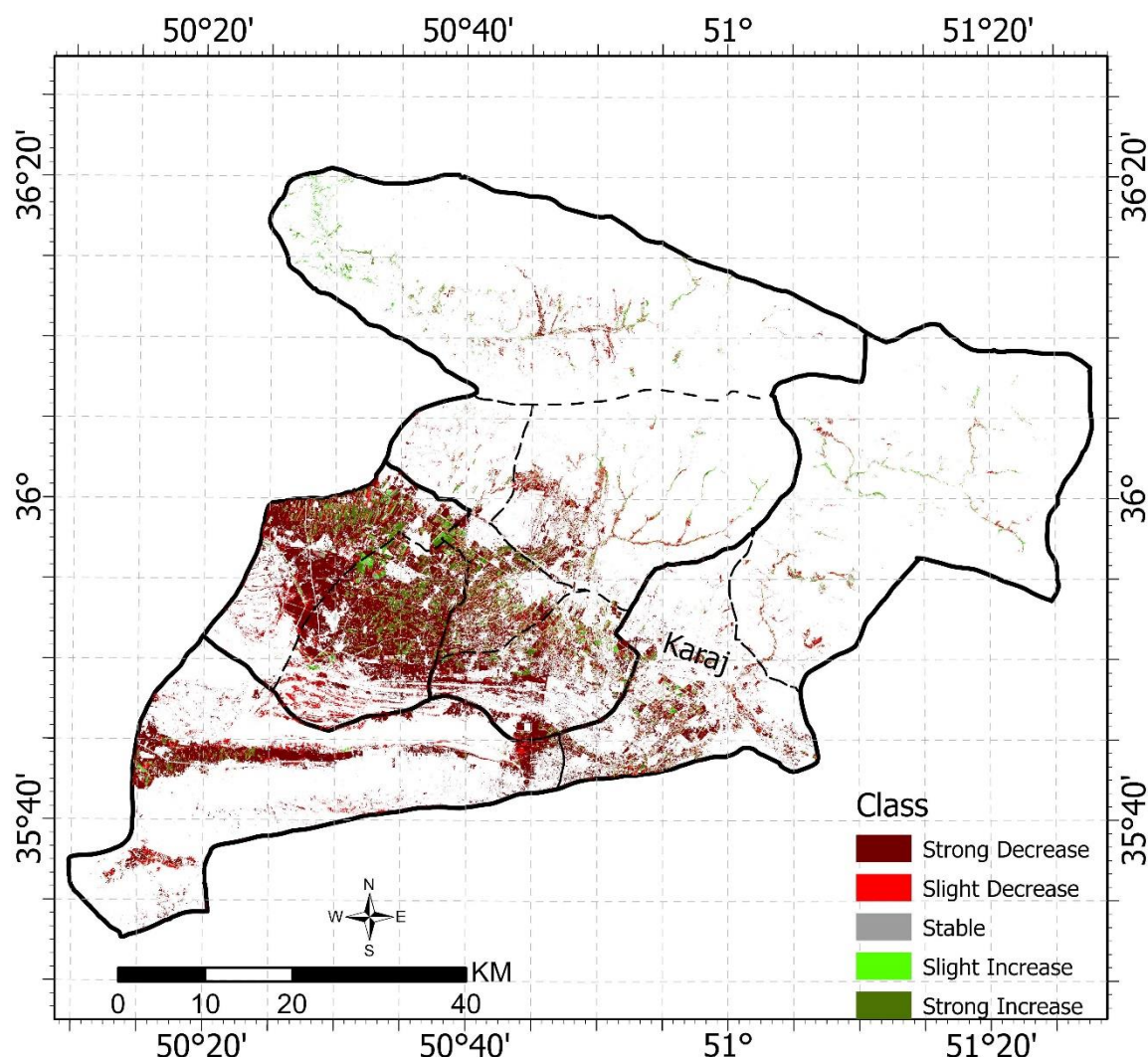
با توجه به این تحلیل، می‌توان نتیجه گرفت که روند کلی تغییرات NDVI در استان البرز منفی بوده و نیازمند توجه جدی در مدیریت منابع طبیعی، مقابله با بیابان‌زایی و بازنگری در کاربری اراضی کشاورزی و مراتع می‌باشد. نتایج این مطالعه می‌تواند پایه‌ای برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و برنامه‌ریزی محیط‌زیستی در سطح استانی و منطقه‌ای فراهم آورد.

تحلیل کمی و تطبیقی روند تغییرات سلامت پوشش گیاهی در اراضی کشاورزی استان البرز

نتایج حاصل از تحلیل روند شاخص NDVI در اراضی کشاورزی استان البرز طی سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۴، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 و الگوریتم رگرسیون خطی پیکسلی، نشان‌دهنده الگوی غالبی از کاهش سلامت پوشش گیاهی در بخش قابل توجهی از این اراضی است (شکل ۳).

طبقه کاهش جزئی (Slight Decrease) با مساحت ۱۲۶۰ کیلومتر مربع (حدود ۲۵ درصد) سومین سهم بزرگ از کل منطقه را دارد. این مناطق نیز به‌طور گسترده‌ای در بخش‌های میانی و غربی استان پراکنده شده‌اند و اغلب به رنگ قرمز روشن نمایش داده شده‌اند. در مجموع، دو طبقه دارای روند کاهشی (کاهش شدید و جزئی) مجموعاً ۲۷۵۴/۵ کیلومتر مربع، معادل بیش از ۵۵ درصد مساحت کل منطقه را تشکیل می‌دهند که هشداردهنده کاهش گسترده در سلامت زیستی گیاهان طی دوره مورد بررسی است.

مساحت طبقات دارای روند افزایشی نسبتاً کمتر است. طبقه افزایش شدید (Strong Increase) با ۷۶۲/۸ کیلومتر مربع حدود ۱۴/۹ درصد و طبقه افزایش جزئی (Slight Increase) با ۲۲۶ کیلومتر مربع حدود ۴/۶ درصد از محدوده مورد مطالعه را شامل می‌شوند. این نواحی که به رنگ سبز تیره و سبز روشن در نقشه مشخص‌اند، عمدتاً در نواحی شمالی و شرقی استان و در حاشیه ارتفاعات و مناطق جنگلی پراکنده شده‌اند. این روند می‌تواند بیانگر بهبود شرایط اکولوژیکی محلی بواسطه



شکل ۱- نقشه پایش سلامت پوشش گیاهی اراضی کشاورزی استان البرز بین سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۴ خورشیدی

خاک، بهره‌برداری بیش‌ازحد و تغییر کاربری به سمت توسعه شهری شکل می‌گیرد. در کنار آن، طبقه کاهش جزئی (Slight Decrease) نیز با ۱۲۹/۸ کیلومتر مربع (حدود ۱۶ درصد) سهم قابل توجهی از زمین‌های کشاورزی را شامل می‌شود. در مجموع، دو طبقه دارای روند کاهشی، سطحی معادل ۶۶۶/۶ کیلومتر مربع (۸۲/۵ درصد از کل اراضی کشاورزی) را پوشش می‌دهند که بیانگر چالش جدی در سلامت اکولوژیکی و پایداری بهره‌برداری از اراضی کشاورزی منطقه است.

در مقابل، سهم طبقات با روند مثبت در NDVI بسیار کمتر است. طبقه افزایش شدید (Strong Increase) تنها ۶۴/۷ کیلومتر مربع (۸ درصد) و طبقه افزایش جزئی

طبقه‌بندی تغییرات به پنج کلاس اصلی (کاهش شدید، کاهش جزئی، پایدار، افزایش جزئی، افزایش شدید) و تحلیل کمی آن‌ها حاکی از آن است که بیش از ۸۰ درصد اراضی کشاورزی استان روندی نزولی در شاخص NDVI را تجربه کرده‌اند.

بیشترین مساحت به کلاس کاهش شدید (Strong Decrease) با ۵۳۶/۸ کیلومتر مربع تعلق دارد که معادل حدود ۶۶/۵ درصد کل اراضی کشاورزی استان است. این نواحی به رنگ قرمز تیره در نقشه مشخص هستند و نمایانگر افت محسوس در مقدار NDVI در طول زمان می‌باشند. چنین روندی معمولاً تحت تأثیر عواملی همچون خشکسالی‌های پی‌درپی، کاهش منابع آب، تخریب

(Slight Increase) حدود ۴۹/۲ کیلومتر مربع (۶ درصد) از سطح اراضی کشاورزی را به خود اختصاص داده‌اند. این مناطق که به رنگ سبز در نقشه نمایان هستند، عمدتاً در نواحی شمالی و پراکنده استان قرار دارند و احتمالاً مرتبط با توسعه باغات در این محدوده هستند. طبقه پایدار (Stable) نیز سهم ناچیزی را دارد و تنها ۵۱/۳ کیلومتر مربع (حدود ۶/۳ درصد) را شامل می‌شود.

مقایسه نتایج حاصل از این مطالعه با مطالعات صورت گرفته در سایر نقاط جهان (بنتو و همکاران، ۲۰۲۰؛ یون و کیم، ۲۰۲۰؛ خان و همکاران، ۲۰۲۵) نشان می‌دهد که فشارهای اقلیمی، مدیریتی و انسانی می‌توانند منجر به افت پیوسته در سلامت پوشش گیاهی اراضی زراعی شوند. مطالعه حاضر در استان البرز نیز در چنین بستری از روندهای جهانی جای می‌گیرد و نشان می‌دهد که فشارهای اقلیمی، مدیریتی و انسانی چگونه می‌توانند به افت پیوسته در سلامت پوشش گیاهی اراضی زراعی منجر شوند. در عین حال، نواحی دارای روند افزایشی در NDVI می‌توانند به عنوان مناطق الگو مورد بررسی بیشتر قرار گیرند تا عوامل موفقیت آن‌ها شناسایی و در سایر مناطق تعمیم یابد. این اطلاعات می‌تواند برای سیاست‌گذاران و مدیران منابع طبیعی در جهت طراحی راهبردهای سازگار با تغییر اقلیم، احیای زمین‌های تخریب‌شده، بهبود بهره‌وری کشاورزی و حفاظت از منابع آبی حیاتی مورد استفاده قرار گیرد.

نتایج این مطالعه، که با بهره‌گیری از داده‌های سری‌زمانی شاخص NDVI و پردازش تصاویر Sentinel-2 در بستر Google Earth Engine به‌دست آمده‌اند، زنگ خطر جدی برای آینده کشاورزی در استان البرز به صدا درمی‌آورد. تحلیل‌های صورت گرفته نشان می‌دهند که بیش از ۸۰ درصد از اراضی کشاورزی استان روند کاهشی در شاخص سلامت گیاهی را تجربه کرده‌اند. این کاهش در بسیاری موارد، نه حاصل نوسانات طبیعی، بلکه نتیجه مستقیم فشارهای مدیریتی، بهره‌برداری بیش از ظرفیت منابع و نبود سیاست‌های منسجم در حوزه کاربری اراضی است.

از منظر مدیریتی، چنین روندی بیانگر فرسودگی زیستی زمین‌های کشاورزی است که مستقیماً بر بهره‌وری محصولات، امنیت غذایی منطقه و معیشت روستاییان اثرگذار خواهد بود. ادامه این وضعیت می‌تواند به تسریع در تخلیه جمعیت روستایی، کاهش بازده اقتصادی کشاورزی و افزایش وابستگی به واردات محصولات زراعی منجر شود.

تحلیل فضایی نتایج نشان می‌دهد که کاهش شدید NDVI عمدتاً در مناطق مرکزی و جنوبی استان متمرکز است؛ جایی که فشار توسعه شهری، تغییر کاربری به سکونت و صنعت، و برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی به شدت بالاست. این الگو نشان دهنده فقدان طرح‌های مدیریت یکپارچه است.

از سوی دیگر، نواحی محدود دارای روند افزایشی NDVI که در مناطق شمالی و ارتفاعات البرز مرکزی قرار دارند، به‌عنوان نمونه‌های موفق تاب‌آوری اکولوژیکی و شاید مدیریتی قابل تحلیل هستند. ممکن است در این مناطق بهره‌گیری از شیوه‌های کشت پایدار، مدیریت منابع آبی کارآمد یا وجود پوشش طبیعی حفاظت‌شده، منجر به بهبود وضعیت سلامت گیاهی شده باشد. استخراج این تجارب و تعمیم آن‌ها به مناطق بحرانی می‌تواند بخشی از برنامه احیای کشاورزی استان باشد.

با توجه به این نتایج، پیشنهاد‌های مدیریتی زیر مطرح می‌شود:

۱- استقرار سامانه پایش مستمر سلامت گیاهی با استفاده از داده‌های سنجنش از دور و سامانه‌های برخط به‌عنوان ابزار تصمیم‌یار برای رصد دوره‌ای پوشش گیاهی، تشخیص نقاط بحرانی و اولویت‌بندی مداخلات مدیریتی.

۲- بازنگری در سیاست‌های تخصیص آب کشاورزی و تمرکز بر افزایش راندمان آبیاری، جلوگیری از برداشت بی‌رویه منابع آب زیرزمینی و آموزش کشاورزان برای استفاده بهینه از منابع.

۳- توسعه طرح‌های مدیریت تلفیقی زمین مانند اجرای طرح‌های جامع برای مدیریت کاربری اراضی به‌گونه‌ای که

"کاهش شدید"، همراه با مشوق‌هایی برای کشاورزان
به‌منظور اجرای کشاورزی پایدار.

۵-افزایش تاب‌آوری مناطق سبز باقی‌مانده با هدف حفظ
"هسته‌های سبز" در سیستم اکولوژیکی استان.

بین کشاورزی، توسعه شهری و منابع طبیعی توازن برقرار
شود.

۴-احیای اراضی تخریب‌شده و مشوق‌های زیست‌محیطی
برای بازگرداندن سلامت اکولوژیکی اراضی در کلاس‌های

فهرست منابع

۱. خوارزمی، رسول، محمداسماعیل، زهرا، چترنور، منصور. ۱۴۰۳. تعیین دامنه تغییرکاربری اراضی استان البرز با استفاده از داده‌های راداری و نوری سنتینل در سامانه گوگل ارث انجین، مدیریت اراضی، ۱۲(۲)، ۸۹-۱۰۲.
۲. شبانی پور، مهنوش، درویش صفت، علی اصغر، رحمانی، رامین. ۱۳۹۸. تحلیل روند بلندمدت تغییرات پوشش گیاهی با استفاده از سری زمانی MODIS-NDVI مطالعه موردی: استان کردستان، نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب، ۷۲(۳)، ۱۹۳-۲۰۴.
3. Ahmadi, M., Ghasemi, A., Jafari, R. 2022. Monitoring urban expansion impacts on vegetation health in peri-urban areas of Iran using Sentinel-2 and EVI. *Journal of Applied Remote Sensing*, 16(3), 034502.
4. Bahrami, M., Sarmadian, F., & Pazira, E. 2024. Integrating AHP (Analytic Hierarchy Process) and GIS (Geographic Information System) for precision land use planning and ecological capacity assessment in Alborz Province, Iran. *EQA - International Journal of Environmental Quality*, 64, 48-67.
5. Bannari, A., Morin, D., Bonn, F. and Huete, A., 1995. A review of vegetation indices. *Remote sensing reviews*, 13(1-2), pp.95-120.
6. Baret, F. and Guyot, G., 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote sensing of environment*, 35(2-3), pp.161-173.
7. Bento, V.A., Gouveia, C.M., DaCamara, C.C., Libonati, R. and Trigo, I.F., 2020. The roles of NDVI and Land Surface Temperature when using the Vegetation Health Index over dry regions. *Global and Planetary Change*, 190, p.103198.
8. Candra, D.S., Phinn, S. and Scarth, P., 2020. Cloud and cloud shadow masking for Sentinel-2 using multitemporal images in global area. *International Journal of Remote Sensing*, 41(8), pp.2877-2904.
9. Chen, Y., Wang, J., & Li, X. (2023). Assessing the impact of land use change on ecosystem services using Sentinel-1 and Sentinel-2 data. *Remote Sensing of Environment*, 286, 113445.
10. Deng, L., Mao, Z., Li, X., Hu, Z., Duan, F. and Yan, Y., 2018. UAV-based multispectral remote sensing for precision agriculture: A comparison between different cameras. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 146, pp.124-136.
11. Fakhri, S. A., Latifi, H., & Mohammadi, J. (2022). Integration of Sentinel-1 and Sentinel-2 data for improved forest health monitoring. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 25, 100678. Fu, Y., Huang, J., & Zhang, X. (2020). Assessing the impact of urbanization on vegetation cover using Landsat-based NDVI in agricultural regions. *Journal of Environmental Management*, 268, 110658.
12. Gascon, F., Bouzinac, C., Thépaut, O., Jung, M., Francesconi, B., Louis, J., Lonjou, V., Lafrance, B., Massera, S., Gaudel-Vacaresse, A. and Languille, F., 2017. Copernicus Sentinel-2A calibration and products validation status. *Remote Sensing*, 9(6), p.584.
13. Giovos, R., Tassopoulos, D., Kalivas, D., Lougkos, N. and Priovolou, A., 2021. Remote sensing vegetation indices in viticulture: A critical review. *Agriculture*, 11(5), p.457.
14. Hu, Y., Raza, A., Syed, N.R., Acharki, S., Ray, R.L., Hussain, S., Dehghanisani, H., Zubair, M. and Elbeltagi, A., 2023. Land use/land cover change detection and NDVI estimation in Pakistan's Southern Punjab Province. *Sustainability*, 15(4), p.3572.

15. Jiang, L., Liu, Y., Wu, S. and Yang, C., 2021. Analyzing ecological environment change and associated driving factors in China based on NDVI time series data. *Ecological indicators*, 129, p.107933.
16. Kharazmi, R., MohammadEsmail, Z., Chatrenour, M. (2025). 'Using Sentinel radar and optical data in the Google Earth Engine platform to determine the extent of land use changes in Alborz Province', *Land Management Journal*, 12(2), pp. 89-102
17. Kumar, P., Sahani, R., & Kumar, S. (2021). Impact of land use change on soil moisture and vegetation health using NDWI and Sentinel-2 data. *Ecological Indicators*, 125, 107539.
18. Lan, S., & Dong, Z. (2022). Incorporating Vegetation Type Transformation with NDVI Time-Series to Study the Vegetation Dynamics in Xinjiang. *Sustainability*, 14(1), 582.
19. Liu, X., Zhang, Y., & Wang, L. (2021). Evaluating the effectiveness of farmland protection policies using MODIS and VHI. *Land Use Policy*, 108, 105584
20. Louis, J., Pflug, B., Main-Knorn, M., Debaecker, V., Mueller-Wilm, U., Iannone, R.Q., Cadau, E.G., Boccia, V. and Gascon, F., 2019, July. Sentinel-2 global surface reflectance level-2A product generated with Sen2Cor. In *IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 8522-8525). IEEE.
21. Maxwell, A.E., Warner, T.A. and Fang, F., 2018. Implementation of machine-learning classification in remote sensing: An applied review. *International journal of remote sensing*, 39(9), pp.2784-2817.
22. Nikpour, N., Negaresh, H., Fotoohi, S., Hosseini, S. Z., & Bahrami, S. (2019). Monitoring the trend of vegetation changes one of the most important indicators of land degradation (in Ilam province). *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 5(4), 21-48.
23. Nikpour, N., Negaresh, H., Fotoohi, S., Hosseini, S.Z. and Bahrami, S., 2019. Monitoring the trend of vegetation changes one of the most important indicators of land degradation (in Ilam province).
24. Nuthammachot, N., Askar, A., Stratoulis, D. and Wicaksono, P., 2022. Combined use of Sentinel-1 and Sentinel-2 data for improving above-ground biomass estimation. *Geocarto International*, 37(2), pp.366-376.
25. Pandey, P.C. and Sharma, L.K. eds., 2021. *Advances in remote sensing for natural resource monitoring*. John Wiley & Sons.
26. Park TaeJin, P.T., Chen Chi, C.C., Macias-Fauria, M., Tømmervik, H., Choi SungHo, C.S., Winkler, A., Bhatt, U.S., Walker, D.A., Piao ShiLong, P.S., Brovkin, V. and Nemani, R.R., 2019. Changes in timing of seasonal peak photosynthetic activity in northern ecosystems.
27. Raiyani, K., Gonçalves, T., Rato, L., Salgueiro, P. and Marques da Silva, J.R., 2021. Sentinel-2 image scene classification: A comparison between Sen2Cor and a machine learning approach. *Remote Sensing*, 13(2), p.300.
28. Rezaei, H., Mehrabi, B., Khanmirzaee, A. and Shahbazi, K., 2021. Arsenic heavy metal mapping in agricultural soils of Alborz province, Iran. *International Journal of Environmental Analytical Ch Khan, A., Alamgir, A. and Fatima, N., 2025. Spatiotemporal analysis of land use and land cover changes, LST and NDVI in Thatta district, Sindh, Pakistan. Kuwait Journal of Science*, 52(1), p.100326. *emistry*, 101(1), pp.127-139.
29. Thenkabail, P. S., & Lyon, J. G. (2020). Advances in remote sensing for agriculture and natural resource management. *Remote Sensing*, 12(24), 4032.

30. West, H., Quinn, N. and Horswell, M., 2019. Remote sensing for drought monitoring & impact assessment: Progress, past challenges and future opportunities. *Remote Sensing of Environment*, 232, p.111291.
31. Yoon, H. and Kim, S., 2020. Detecting abandoned farmland using harmonic analysis and machine learning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 166, pp.201-212.
32. Zanaga, D., Van De Kerchove, R., De Keersmaecker, W., Souverijns, N., Brockmann, C., Quast, R., Wevers, J., Grosu, A., Paccini, A., Vergnaud, S., Cartus, O., Santoro, M., Fritz, S., Georgieva, I., Lesiv, M., Carter, S., Herold, M., Li, Linlin, Tsendbazar, N.E., Ramoino, F., Arino, O., 2021. ESA WorldCover 10 m 2020 v100
33. Zekoll, V., Main-Knorn, M., Alonso, K., Louis, J., Frantz, D., Richter, R. and Pflug, B., 2021. Comparison of masking algorithms for sentinel-2 imagery. *Remote Sensing*, 13(1), p.137.
34. Zhang, X., Chen, N., Li, J., & Chen, Z. (2020). Multi-sensor integrated framework for vegetation health monitoring using machine learning. *Remote Sensing*, 12(15), 2456.
35. Zhen, Z., Chen, S., Qin, W., Yan, G., Gastellu-Etchegorry, J.P., Cao, L., Murefu, M., Li, J. and Han, B., 2020. Potentials and limits of vegetation indices with brdf signatures for soil-noise resistance and estimation of leaf area index. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(7), pp.5092-5108.
36. Zhen, Z., Chen, S., Qin, W., Yan, G., Gastellu-Etchegorry, J.P., Cao, L., Murefu, M., Li, J. and Han, B., 2020. Potentials and limits of vegetation indices with brdf signatures for soil-noise resistance and estimation of leaf area index. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(7), pp.5092-5108.

شیمی‌سنجی عناصر بالقوه سمی در خاک سطحی کلان‌شهر همدان

نیره‌سادات حسینی^۱ و سهیل سبحان اردکانی^{۲*} ^۱-دکتری تخصصی محیط‌زیست، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران. ns_hosseini@iau.ac.ir^۲-استاد علوم محیط‌زیست، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران. s_sobhan@iau.ac.ir

«مقاله پژوهشی»

دریافت: ۱۴۰۴/۴/۲۴ و پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۱۶

چکیده

آلودگی خاک شهری به آلاینده‌های سمی به‌عنوان مانعی مهم برای توسعه پایدار بوده و چالش و نگرانی مشترک محیط‌زیستی و بهداشتی بوم‌سامانه‌های شهری در سراسر جهان است. از این‌رو، این پژوهش با هدف تعیین محتوی، تغییرات مکانی، آلودگی و سمیت عناصر بالقوه سمی (آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل) خاک سطحی کلان‌شهر همدان در سال ۱۴۰۲ انجام یافت. به این منظور، در مجموع ۱۰۸ نمونه خاک سطحی (۰-۲۰ سانتی‌متری) از ۱۲ مکان با کاربری‌های صنعتی، تجاری و مسکونی (۴ مکان نمونه‌برداری از هر کاربری) برداشت شد. پس از آماده‌سازی و هضم اسیدی نمونه‌ها در آزمایشگاه، محتوی عناصر در آن‌ها به‌روش طیف‌سنجی نوری پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-OES) خوانده شد. مقادیر شاخص‌های فاکتور آلودگی (CF)، بار آلودگی (PLI)، میانگین ضریب متوسط حدود اثر (mERM-Q) و میانگین ضریب سطح احتمالی اثر (mPEL-Q) محاسبه گردید. تغییرات مکانی محتوی عناصر نشان‌دهنده تأثیر فعالیت‌های انسانی به‌ویژه با منشأ صنعتی و ترافیک بر آلودگی خاک بود. محاسبه شاخص CF نشان داد که آلودگی عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل از "کم" تا "زیاد" متغیر بود. همچنین، میانگین مقادیر شاخص بار آلودگی با ۱/۰، بیان‌گر شرایط آلودگی "متوسط" در منطقه مورد مطالعه بود. نتایج ارزیابی سمیت محیطی و زیستی نشان داد که در همه مناطق مقادیر شاخص‌های mERM-Q و mPEL-Q برای عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل با ۲۱٪ احتمال سمیت در طبقه "سمیت متوسط" قرار داشتند. با استناد به نتایج می‌توان اذعان داشت که فعالیت‌های صنعتی و ترافیکی به‌عنوان منبع اصلی و عمده عناصر مورد مطالعه نقش مهمی در آلودگی خاک شهر همدان دارند. لذا، به‌منظور حفظ سلامت محیط و شهروندان نسبت به پایش دوره‌ای و منظم خاک سطحی شهری آورده به عناصر بالقوه سمی و ارزیابی ریسک بوم‌شناختی و سلامت مواجهه با عناصر به‌ویژه در مناطق با آلودگی زیاد توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: خاک شهری، آلاینده‌های سمی، شاخص آلودگی، سمیت محیطی.

* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: s_sobhan@iau.ac.ir

استناد: حسینی، ن.س.، سبحان اردکانی، س. ۱۴۰۴. شیمی‌سنجی عناصر بالقوه سمی در خاک سطحی کلان‌شهر همدان. مقاله پژوهشی، نشریه پژوهش‌های خاک،

مقدمه

در قرن حاضر، انتشار فزاینده و مداوم انواع آلاینده‌ها در اجزای مختلف زیست‌بوم شهری به سبب توسعه سریع شهرنشینی، صنعتی، اقتصادی و افزایش تراکم جمعیت و گسترش کاربری‌ها منجر به ایجاد و تشدید آلودگی‌ها و افزایش نگرانی‌های محیط‌زیستی به‌ویژه در کلان‌شهرهای سراسر جهان شده است (حسینی و همکاران، ۲۰۲۰؛ وانگ و همکاران، ۲۰۲۳). در میان طیف وسیعی از آلاینده‌های محیطی، عناصر بالقوه سمی به سبب پایداری، سمیت و تجمع زیستی، چالش و نگرانی مهم و مشترک محیط‌زیستی، بهداشت عمومی و اقتصادی در مقیاس جهانی به‌شمار می‌آیند (وانگ و همکاران، ۲۰۲۴). در این خصوص، آلودگی خاک شهری ناشی از عناصر بالقوه سمی به سبب بقا و دوام طولانی‌تر عناصر در قیاس با محیط آب و یا هوا، از اهمیت بیش‌تری برخوردار بوده و به سبب نقش مهم خاک در ثبات اقتصادی، اجتماعی و بوم‌شناختی، به‌عنوان مخاطره بالقوه بوم‌شناختی، سلامتی و مانعی مهم برای توسعه پایدار به یکی از مهم‌ترین و چالش‌برانگیزترین نگرانی‌ها و مشکلات محیط‌زیستی بوم‌سامانه‌های شهری تبدیل شده است (حسینی و سبحان اردکانی، ۱۴۰۱؛ سینگ و همکاران، ۲۰۲۵). مخاطرات بالقوه زیستی و سلامتی مرتبط با آلاینده‌های فلزی رایج در خاک شهری نه‌تنها ناشی از عناصر غیرضروری همچون آرسنیک، سرب، کادمیم حتی در مقادیر بسیار اندک است، بلکه مترتب از مقادیر زیاد و یا شکل‌های خاص عناصر ضروری نظیر مس و نیکل نیز است (اویامیجی و همکاران، ۲۰۲۴). اختلال در عملکرد ریه، کلیه، کبد، استخوان، سیستم عصبی و خون‌ساز، آسیب‌های پوستی، اثرات تراژونیک و افزایش بروز انواع مختلف سرطان از پیامدهای اصلی مواجهه با غلظت‌های بیش‌تر از حد مجاز این عناصر محسوب می‌شود (سبحان اردکانی و حسینی، ۱۴۰۲a؛ ین و همکاران، ۲۰۲۰). به‌طور کلی ورود و انباشت عناصر سمی در خاک شهری با منشاء طبیعی (هوازگی سنگ، فرسایش و سایر فرآیندهای زمین‌شناسی) و به‌طور عمده انسانی (فعالیت‌های صنعتی،

ترافیک و احتراق سوخت‌های فسیلی) نه‌تنها می‌تواند منجر به کاهش کیفیت خاک و آسیب مداوم به زیست‌بوم شهری شود، بلکه می‌تواند به‌واسطه تبادلات محیطی مستمر بین خاک و سایر اجزای مختلف محیط (تعلیق/بازتعلیق ذرات خاک سطحی، آبشویی و رسوب خشک/مرطوب هواسپهری) به آلودگی سایر ماتریس‌های محیطی (هوا، آب و گیاه) در زیست‌بوم شهری منجر شده و به‌طور بالقوه تهدیدی مضر و غیرمستقیم برای سلامت زیست‌مندان و انسان محسوب شود (حسینی و سبحان اردکانی، ۲۰۲۴؛ کانستانتینو و همکاران، ۲۰۲۴). به‌علاوه، قرار گرفتن در معرض مستقیم ذرات خاک سطحی آلوده از طریق استنشاق، بلع و تماس با پوست می‌تواند اثرات نامطلوب احتمالی عناصر فلزی بر سلامت شهروندان به‌ویژه برای کودکان را افزایش دهد (سبحان اردکانی و حسینی، ۱۴۰۲b؛ جیانگ و همکاران، ۲۰۱۷). از این‌رو، خاک به‌عنوان شاخص مهم منبع و مخزن نهایی عناصر کمیاب و تنظیم‌کننده طبیعی انتقال عناصر به هوا، آب و گیاه ابزاری مهم و کارآمد در ارزیابی و تعیین آلودگی و مخاطرات بالقوه محیط‌زیستی آلاینده‌های فلزی در زیست‌بوم شهری محسوب می‌شود (حسینی و سبحان اردکانی، ۱۴۰۰؛ سیدیگ و همکاران، ۲۰۲۵).

امروزه، تعیین محتوی عناصر بالقوه سمی در خاک سطحی شهری به‌عنوان راهکار اقتصادی و مؤثر به‌منظور ارزیابی آلودگی بوم‌سازگان شهری در راستای حفظ کیفیت و سلامت آن مورد توجه فزاینده‌ای قرار گرفته است (گونچارو و همکاران، ۲۰۲۴). در این راستا، شاخص‌های فاکتور آلودگی (CF) و بار آلودگی (PLI) به‌طور گسترده‌ای در تعیین سطح آلودگی و برآوردی جامع از میزان آلودگی خاک به عناصر بالقوه سمی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (ثابت‌اقلیدی و همکاران، ۲۰۲۰). از سوی دیگر، شاخص‌های میانگین ضریب متوسط حدود اثر (mERM-Q) و میانگین ضریب سطح احتمالی اثر (mPEL-Q) نیز ابزارهای کارآمد و مفید برای تعیین و برآورد سطح سمیت محیطی و زیستی احتمالی خاک به

به سبب توسعه شهری و برخورداری از زیرساخت‌ها و شبکه حمل و نقل جاده‌ای و راه‌های ارتباطی مهم و همچنین افزایش حجم ترافیک درون شهری در معرض آلودگی محیط به ویژه از لحاظ محتوی عناصر بالقوه سمی قرار دارد (حسینی و همکاران، ۲۰۲۰).

نمونه برداری از خاک سطحی

در این پژوهش توصیفی-مقطعی، پس از انجام مطالعه‌های اولیه میدانی و به منظور تعیین محتوی، تغییرات مکانی و ارزیابی آلودگی و سمیت عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل، نسبت به نمونه برداری از خاک سطحی (۲۰-۰ سانتی متری) به روش تصادفی-طبقه‌ای از ۱۲ مکان با کاربری‌های صنعتی (واجد صنایعی نظیر کارگاه‌های تولید محصولات پلاستیکی و چرمی، جوشکاری و آبکاری فلزات و تعمیرگاه‌ها و کارگاه‌های نقاشی خودرو)، تجاری (واجد بیشترین حجم ترافیک) و مسکونی (بیشترین سکونتگاه‌های شهری) در کلان‌شهر همدان (۴ مکان نمونه برداری از هر کاربری) اقدام شد. لازم به ذکر است که تعداد نمونه‌های خاک سطحی با لحاظ کردن محدودیت‌های مالی و زمانی پژوهش تعیین شدند. نمونه برداری در همه مکان‌ها با استفاده از بیلچه استیل در سه نوبت طی فصل تابستان ۱۴۰۲ انجام شد. به منظور ایجاد شرایط یکنواخت و کاهش عوامل مداخله‌گر احتمالی، نمونه برداری در همه مکان‌ها در یک روز کاری با سه تکرار انجام و برای تهیه یک نمونه همگن از هر منطقه، نمونه‌های خاک سطحی مجزای جمع‌آوری شده با یکدیگر مخلوط و در کیسه‌های پلی اتیلنی زیپ‌دار با برچسب معین ذخیره و برای پردازش‌های بعدی به آزمایشگاه منتقل شدند (اوپادوای و همکاران، ۲۰۲۴). از این‌رو، تعداد کل نمونه‌های خاک سطحی در مجموع ۱۰۸ عدد (۳۶ نمونه کاربری صنعتی، ۳۶ نمونه کاربری تجاری و ۳۶ نمونه کاربری مسکونی) بود. مختصات جغرافیایی مکان‌های نمونه برداری نیز توسط دستگاه موقعیت‌یاب مکانی (GPS)

عناصر کمیاب به شمار می‌آیند (لیو و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین، تعیین تغییرات مکانی محتوی عناصر بالقوه سمی خاک سطحی شهری افزون بر این‌که ابزار تشخیصی مناسب برای شناسایی و اولویت‌بندی مناطق با خطرات بالقوه ناشی از انباشت و آلودگی عناصر سمی محسوب می‌شود، برای درک، تجزیه و تحلیل و کنترل منابع آلودگی نیز حائز اهمیتی ویژه و به سزا است (پیلکوا و همکاران، ۲۰۲۴).

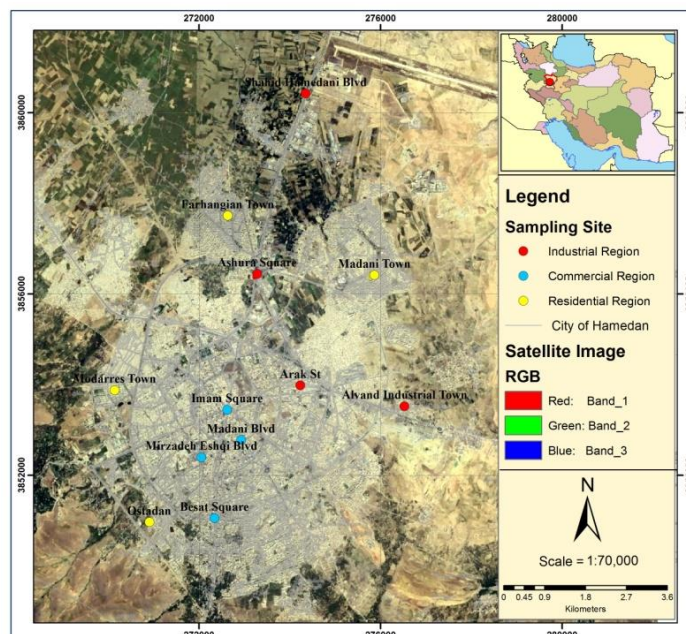
اگرچه، تاکنون مطالعه‌های متعددی در رابطه با ارزیابی آلودگی عناصر بالقوه سمی خاک سطحی شهری در شهرهای مختلف در سراسر دنیا انجام شده است (کای و همکاران، ۲۰۱۹؛ جهاننداری و همکاران، ۲۰۲۰؛ گونچارو و همکاران، ۲۰۲۴؛ گوپال و همکاران، ۲۰۲۴)؛ با این حال، در تعداد اندکی از آن‌ها نسبت به ارزیابی تغییرات مکانی آلودگی فلزی خاک شهری تحت تأثیر کاربری‌های عمده شهری اقدام شده است (بینش‌پور و همکاران، ۲۰۲۱؛ لی و همکاران، ۲۰۲۲). افزون بر این، نظر به توسعه فزاینده شهری، صنعتی، زیرساخت‌ها و شبکه حمل و نقل شهری و افزایش حجم ترافیک درون شهری همدان از یک سو، و اثرات نامطلوب آلودگی احتمالی خاک سطحی شهری بر کیفیت محیط و سلامت شهروندان، این پژوهش با هدف تعیین محتوی، تغییرات مکانی، ارزیابی آلودگی و سمیت عناصر بالقوه سمی در خاک سطحی شهر همدان در سال ۱۴۰۲ انجام شد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

کلان‌شهر همدان به عنوان مرکز استان همدان با وسعت تقریبی ۵۶ کیلومتر مربع و ۶۵۲۰۰۰ نفر جمعیت در ارتفاع حدود ۱۸۵۰ متر از سطح دریا بین مدارهای ۳۴° ۴۷' تا ۳۶° ۴۹' درجه طول جغرافیایی شرقی و ۵۵° ۳۳' تا ۴۵° ۳۵' درجه عرض جغرافیایی شمالی، در غرب ایران واقع شده است. میانگین دمای سالانه و بارندگی این شهر به ترتیب برابر با ۱۱/۳ درجه سلسیوس و ۳۱۸ میلی متر ثبت شده است. شهر همدان به عنوان اولین قطب جمعیتی استان،

گارمین مدل 32X ETRE ثبت شدند که موقعیت استقرار آنها در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱- نقشه موقعیت استقرار مکان‌های نمونه‌برداری

آماده‌سازی نمونه‌های خاک سطحی و تعیین محتوی عناصر در آنها

در این پژوهش، برای آماده‌سازی نمونه‌ها و آنالیز دستگاهی آنها از مواد شیمیایی و معرف‌هایی با درجه خلوص بالا خریداری شده از شرکت‌های مرک آلمان و سیگما-آلدریچ اسپانیا استفاده شد.

نمونه‌های خاک در آزمایشگاه ابتدا هوا خشک شده و سپس به منظور حذف ذرات بزرگ و بقایای آلی از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند (حسینی و همکاران، ۲۰۲۲).

برای تعیین غلظت کل عناصر در نمونه‌های مورد مطالعه، ۵۰۰ گرم از هر نمونه خاک سطحی را به‌طور مجزا به بشر ۲۵۰ میلی‌لیتری منتقل کرده و پس از افزودن ۱۲ میلی‌لیتر از مخلوط اسید نیتریک و اسید هیدروکلریک به هر بشر (۳:۱ اسید نیتریک به ۶۵٪ به اسید هیدروکلریک ۳۰٪)، محلول‌ها در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس، به مدت سه ساعت بازروانی (Reflux) شدند. محلول‌ها پس از سرد شدن توسط کاغذ صافی واتمن ۴۲ صاف، به ارلن ۱۰۰

میلی‌لیتری منتقل و با آب دوبار تقطیر به حجم رسانده شد (حسینی و همکاران، ۲۰۲۲؛ لی و همکاران، ۲۰۲۵). در نهایت، پس از ساخت محلول مادر (استوک) و استاندارد نمک عناصر و کالیبره کردن دستگاه نشر اتمی Varian مدل ES-۷۱۰، محتوی عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل در نمونه‌ها خوانده شد. تضمین و کنترل کیفیت (Control Quality Assurance/Quality) اندازه‌گیری‌ها نیز با استفاده از مرجع استاندارد خاک (SQC-001, Sigma-Aldrich, Spain) خریداری شده از شرکت سیگما-آلدریچ اسپانیا بررسی شدند. بر این اساس، مقادیر حد تشخیص برای عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل به ترتیب برابر با ۰/۰۳۸، ۰/۰۲۰۴، ۰/۰۶۲ و ۰/۰۵۴ میلی‌گرم در کیلوگرم و مقادیر محدودیت کمی عناصر (میلی‌گرم در کیلوگرم) نیز برای عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل به ترتیب برابر با ۰/۲۶۱، ۰/۱۱۷، ۰/۶۱۲، ۰/۱۷۹ و ۰/۱۵۶ به دست آمدند. نتایج حاصل از درصد بازیابی عناصر مورد مطالعه (بین ۹۰/۶-۹۹/۸٪) نیز نشان داد که روش مورد استفاده برای

در رابطه ۲، CF_i و n به‌ترتیب بیان‌گر فاکتور آلودگی برای هر عنصر و تعداد عناصر مورد بررسی هستند. جدول ۱ سطوح آلودگی و تفسیر آن‌ها برای شاخص PLI را نشان می‌دهد (تامپلسون و همکاران، ۱۹۸۰).

ارزیابی سمیت محیطی و زیستی احتمالی عناصر

در این پژوهش، به‌منظور تعیین و برآورد سمیت محیطی و زیستی احتمالی عناصر مورد مطالعه، شاخص‌های میانگین ضریب متوسط حدود اثر ($mERM-Q$) و میانگین ضریب سطح احتمالی اثر ($mPEL-Q$) عناصر با استفاده از روابط ۳ و ۴ محاسبه شدند (حق‌نظر و همکاران، ۲۰۲۱):

رابطه (۳)

$$mERM-Q = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{ERM}}{n}$$

رابطه (۴)

$$mPEL-Q = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{PEL}}{n}$$

در روابط ۳ و ۴، C_i و n به‌ترتیب بیان‌گر غلظت هر عنصر مورد مطالعه بر حسب میلی‌گرم در کیلوگرم و تعداد عناصر مورد مطالعه؛ ERM و PEL نیز به‌ترتیب متوسط حدود اثر هر عنصر مورد مطالعه (برابر با ۷۰/۰، ۲۱۸، ۹/۶۰، ۲۷۰ و ۵۱/۶ به‌ترتیب برای عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل) و حدود احتمالی اثر غلظت هر عنصر مورد مطالعه (برابر با ۱۷/۰، ۱۱۰، ۴/۲۰، ۱۱۰ و ۴۳/۰ به‌ترتیب برای عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل) را نمایندگی می‌کنند (حق‌نظر و همکاران، ۲۰۲۱). طبقه‌بندی و تفسیر مقادیر شاخص‌های $mERM-Q$ و $mPEL-Q$ در جدول ۱ آورده شده است (حسینی و سبحان اردکانی، ۱۴۰۱).

تعیین محتوی عناصر بالقوه سمی مورد مطالعه از دقت مناسب برخوردار بوده است. همچنین، pH نمونه‌های خاک در عصاره گل اشباع (۱:۵ خاک به آب) با استفاده از دستگاه pH متر (Jenway, UK, ۳۵۲۰) اندازه‌گیری شد (حسینی و سبحان اردکانی، ۱۴۰۲؛ گوجره و همکاران، ۲۰۲۱).

ارزیابی آلودگی خاک سطحی به عناصر بالقوه سمی

در این پژوهش، به‌منظور ارزیابی سطح آلودگی ناشی از هر یک از عناصر بالقوه سمی مورد مطالعه و همچنین برآورد جامعی از سطح آلودگی تجمعی عناصر در نمونه‌های خاک سطحی نسبت به محاسبه شاخص‌های CF و PLI به‌ترتیب با استفاده از رابطه‌های ۱ و ۲ اقدام شد (تامپلسون و همکاران، ۱۹۸۰؛ کاغذچی و سلیمانی، ۲۰۲۳):

رابطه (۱)

$$CF = \frac{C_{sample}}{C_{background}}$$

در رابطه ۱، C_{sample} و $C_{background}$ به‌ترتیب نشان‌دهنده محتوی عنصر مورد نظر در نمونه خاک سطحی و غلظت عنصر در پوسته زمین (برابر با ۲/۰، ۳۴/۲، ۰/۲۳۰، ۲۸/۳ و ۴۵/۷ به‌ترتیب برای عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل) هر دو بر حسب میلی‌گرم در کیلوگرم هستند (عظیم‌زاده و خادمی، ۱۳۹۲). سطوح آلودگی و تفسیر آن‌ها بر اساس مقادیر CF در جدول ۱ آورده شده است (هاکسون، ۱۹۸۰).

رابطه (۲)

$$PLI = (CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \times \dots \times CF_n)^{\frac{1}{n}}$$

شاخص فاکتور آلودگی (CF)		شاخص بار آلودگی (PLI)	
محدوده	طبقه توصیفی	محدوده	طبقه توصیفی
$CF < 1$	آلودگی کم	$PLI < 1$	آلودگی کم
$1 \leq CF < 3$	آلودگی متوسط	$1 \leq PLI < 2$	آلودگی متوسط
$3 \leq CF < 6$	آلودگی زیاد	$2 \leq PLI < 3$	آلودگی زیاد
$CF \geq 6$	آلودگی خیلی زیاد	$PLI \geq 3$	آلودگی خیلی زیاد
شاخص میانگین ضریب متوسط حدود اثر (mERM-Q)		شاخص میانگین ضریب سطح احتمالی اثر (mPEL-Q)	
محدوده	طبقه توصیفی	محدوده	طبقه توصیفی
$mERM-Q < 0.1$	۹٪ احتمال سمیت (کم)	$mPEL-Q < 0.1$	۹٪ احتمال سمیت (کم)
$0.1 \leq mERM-Q < 0.5$	۲۱٪ احتمال سمیت (متوسط)	$0.1 \leq mPEL-Q < 1/5$	۲۱٪ احتمال سمیت (متوسط)
$0.5 \leq mERM-Q < 1/5$	۴۹٪ احتمال سمیت (زیاد)	$1/5 \leq mPEL-Q < 2/3$	۴۹٪ احتمال سمیت (زیاد)
$mERM-Q \geq 1/5$	۷۶٪ احتمال سمیت (خیلی زیاد)	$mPEL-Q \geq 2/3$	۷۶٪ احتمال سمیت (خیلی زیاد)

پردازش آماری داده‌ها

پردازش آماری داده‌ها با استفاده از نسخه ۲۰ نرم‌افزار SPSS در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ انجام یافت. برای بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها و برابری واریانس‌ها به ترتیب از آزمون‌های شاپیرو-ویلک (Shapiro-Wilk) و لوین (Leven) استفاده شد. از آزمون تحلیل واریانس بین آزمودنی یک‌طرفه (One-Way ANOVA) و آزمون تعقیبی چند دامنه‌ای دانکن (Duncan Multiple Range Test) نیز برای مقایسه میانگین محتوی عناصر بین کاربری‌های مختلف استفاده شد.

نتایج و بحث

آمار توصیفی مربوط به تعیین مقادیر عناصر

بالقوه سمی و pH در نمونه‌های خاک سطحی

بر اساس نتایج آزمون شاپیرو-ویلک، داده‌های مربوط به محتوی همه عناصر و مقادیر pH در نمونه‌های خاک سطحی با توجه به سطح معنی‌داری (p) بزرگ‌تر از ۰/۰۵، از توزیع نرمال برخوردار بودند.

آمار توصیفی مربوط به مقادیر تعیین‌شده عناصر بالقوه سمی و pH در نمونه‌های خاک سطحی در جدول ۲ آورده شده است. بر این اساس، محتوی عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل در خاک سطحی به ترتیب در دامنه ۷/۷۱-۶/۱۹، ۳۳/۶-۸/۱۶، ۰/۱۷۸-۰/۳۵۶، ۰/۳۵-۱۷/۵ و ۳۶/۸-۱۶/۳ میلی‌گرم در کیلوگرم متغیر بود. نتایج آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه نیز نشان داد که بین کاربری‌های

مختلف از حیث میانگین محتوی عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل در نمونه‌های خاک سطحی اختلاف معنی‌دار آماری ($p < 0.05$) وجود داشته است. بیشینه میانگین محتوی عناصر آرسنیک، کادمیم، مس و نیکل به ترتیب با ۶/۹۹، ۰/۳۰۴، ۳۲/۰ و ۲۴/۹ میلی‌گرم در کیلوگرم همگی مربوط به نمونه‌های خاک سطحی جمع‌آوری شده از کاربری صنعتی بود. از طرفی، بیشینه میانگین محتوی عنصر سرب ۳۱/۳ میلی‌گرم در کیلوگرم به نمونه‌های خاک سطحی مناطق تجاری تعلق داشت. از سوی دیگر، میانگین محتوی عناصر (همه کاربری‌ها) در نمونه‌ها از روند نزولی مس < نیکل < سرب < آرسنیک < کادمیم تبعیت کرد. علاوه بر این، روند نزولی میانگین محتوی عناصر آرسنیک، کادمیم، مس و نیکل برای کاربری‌های مختلف به صورت صنعتی < تجاری < مسکونی بود. این در حالی است که میانگین محتوی عنصر سرب برای کاربری‌های مختلف از روند نزولی تجاری < صنعتی < مسکونی تبعیت کرد.

با استناد به یافته‌ها، محتوی متمایز عناصر خاک سطحی شهری از مناطق عملکردی مختلف افزون بر این‌که بیانگر تأثیر قابل توجه تفاوت و تنوع منشا انتشار عناصر ناشی از فعالیت‌های مختلف شهری است، نشان می‌دهد که انتشارات ناشی از فعالیت‌های صنعتی و ترافیکی عوامل اصلی و عمده احتمالی افزایش محتوی عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل در خاک منطقه مورد مطالعه بوده است. در مطالعات مشابه و در تایید نتایج حاصل، بینش‌پور و همکاران (۲۰۲۱) و کای و همکاران (۲۰۲۲)

نیز محتوی متمایز عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل به‌ترتیب در خاک شهری اراک (ایران) و هاندان (چین) را به‌طور عمده ناشی از کاربری‌های مختلف شهری و متأثر از انتشارات ترافیکی و صنعتی گزارش کردند. همچنین، دانگ و همکاران (۲۰۲۳) و هوشیاری و همکاران (۲۰۲۳) نیز با ارزیابی تغییرات مکانی محتوی عناصر سمی خاک سطحی در شهرهای بائوشان (چین) و شیراز (ایران) گزارش کردند که تنوع و تفاوت منابع انتشارات انسانی (مانند فعالیت‌های صنعتی و ترافیکی) بر محتوی عناصر فلزی خاک سطحی شهری تأثیرگذار بوده است. به‌طور کلی، آرسنیک شاخص احتراق سوخت فسیلی و کادمیم، مس و نیکل نیز ردیاب‌های اصلی فعالیت‌های صنعتی محسوب می‌شوند. بنابراین، افزایش محتوی این عناصر در مناطق صنعتی را می‌توان با انتشارات ناشی از فعالیت صنایع مختلف به‌ویژه آبکاری و جوشکاری فلزات، محصولات چرمی، پلاستیکی، همچنین کارگاه‌های نقاشی و تعمیرات خودرو در منطقه مورد مطالعه مرتبط دانست. کای و همکاران (۲۰۱۹) و گونچارو و همکاران (۲۰۲۴) نیز با ارزیابی آلودگی عناصر بالقوه سمی در خاک سطحی شهرهای هوآلیا (چین) و یوفا (روسیه) گزارش کردند که بیش‌ترین غلظت عناصر آرسنیک، کادمیم، کروم، مس و نیکل مربوط به نمونه‌های خاک سطحی برداشت‌شده از مناطق صنعتی و ناشی از فعالیت‌های ذوب فلزات و ریخته‌گری، تولید کاغذ، پلاستیک، رنگدانه، نساجی و صنایع غذایی بوده است. از طرفی، انتشار سرب در محیط به‌عنوان ردیاب انتشارات ترافیکی به‌طور عمده ناشی از منابع غیر آگروز (نشت روان‌کننده‌ها و ذرات حاصل از استهلاک و فرسایش لنت ترمز و بدنه خودرو) است (سبحان اردکانی و حسینی، ۱۴۰۲b؛ لی و همکاران، ۲۰۲۴). از این‌رو، حجم زیاد ترافیک و انتشارات ناشی از منابع غیر آگروز را به احتمال زیاد می‌توان با افزایش محتوی سرب در مناطق تجاری مرتبط دانست. نتایج پژوهش آدیمالا و

همکاران (۲۰۲۰) نیز که با هدف ارزیابی آلودگی و خطر سلامتی عناصر بالقوه سمی در خاک سطحی شهرهای جدیمتلا و آلا (هند) انجام یافت، نشان داد که انتشارات مداوم ناشی از ترافیک (نشت روان‌کننده‌ها، سایش و خوردگی قطعات خودرو) منابع عمده افزایش محتوی روی و سرب در خاک سطحی مناطق مورد مطالعه بوده است. همچنین، وانگ و همکاران (۲۰۱۹) با ارزیابی آلودگی منشایابی عناصر بالقوه سمی در خاک سطحی شهرستان پونینگ (چین) و با استناد به تغییرات مکانی محتوی عناصر گزارش کردند که بیشینه محتوی عناصر روی و سرب مربوط به نمونه‌های خاک برداشت‌شده از مناطق دارای حجم زیاد ترافیک و به‌طور عمده مرتبط با انتشارات غیراحتراقی بوده است.

با استناد به نتایج سنجش مقادیر pH در نمونه‌های خاک سطحی (جدول ۲)، مقادیر pH خاک سطحی در دامنه ۸/۳۴-۸/۲۱ متغیر و نشان‌دهنده خاصیت قلیایی خاک در همه کاربری‌های مورد مطالعه بود. به‌طور کلی، pH از جمله مهم‌ترین ویژگی‌های شیمیایی خاک است که به‌سبب تأثیر بر تحرک (حلالیت و فراهمی زیستی) عناصر بالقوه سمی، نقش مهمی در سرنوشت آلاینده‌های فلزی-شبه‌فلزی خاک دارد. در این خصوص، pH قلیایی باعث افزایش احتباس عناصر در خاک می‌شود، این در حالی است که pH اسیدی تأثیر قابل توجهی بر تحرک عناصر دارد (نینا، ۲۰۱۹؛ حسینی و سبحان اردکانی، ۲۰۲۴). مطالعات انجام شده حاکی از آن است که اغلب عناصر در خاک با محدوده pH ۶/۰۰ تا ۹/۰۰ از تحرک و فراهمی زیستی اندک برخوردار هستند (برناردیو و همکاران، ۲۰۱۹). از این‌رو، می‌توان ادعا داشت که pH خاک سطحی شهری از مناطق عملکردی مختلف می‌تواند منجر به کاهش تحرک و دستیابی زیستی عناصر و در نهایت افزایش آلودگی خاک سطحی در منطقه مورد مطالعه شود.

جدول ۲- آمار توصیفی محتوی عناصر مورد مطالعه در نمونه‌های خاک سطحی شهر همدان

کاربری	عناصر (میلی‌گرم در کیلوگرم)	pH
--------	-----------------------------	----

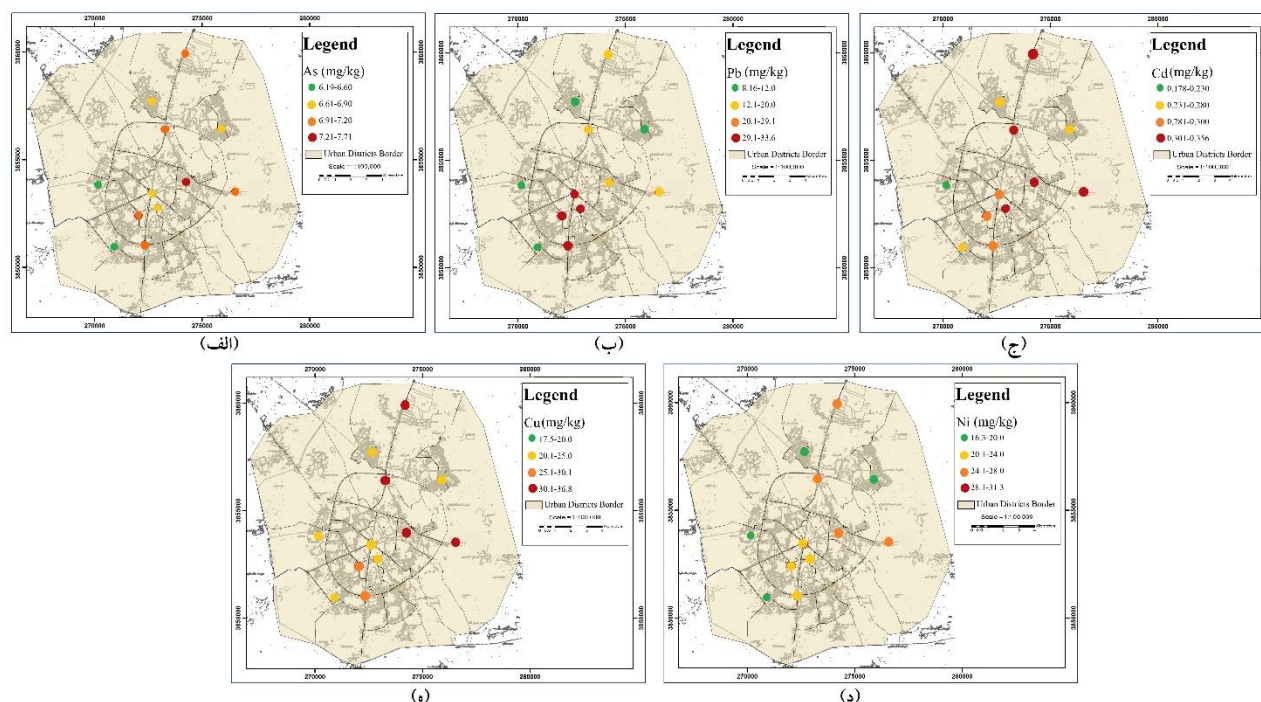
آرسنیک	سرب	کادمیم	مس	نیکل	
مسکونی	۶/۶۸ B	۰/۲۴۱ B	۲۱/۷ C	۱۸/۶ C	۸/۲۱ A
تجاری	۶/۸۰ B	۰/۲۹۷ A	۲۵/۵ B	۲۰/۴ B	۸/۲۸ A
صنعتی	۶/۹۹ A	۰/۳۰۴ A	۳۲/۰ A	۲۴/۹ A	۸/۳۴ A
کمینه	۶/۱۹	۰/۱۷۸	۱۷/۵	۱۶/۳	۸/۰۴
بیشینه	۷/۷۱	۰/۳۵۶	۳۶/۸	۳۱/۳	۸/۸۶
میانگین	۶/۸۲	۰/۲۸۰	۲۶/۴	۲۱/۳	۸/۲۷

مقادیر مشخص شده با حروف بزرگ غیرمشترک (A, B, C و ...) در هر ستون، بیانگر وجود تفاوت معنی دار آماری ($p < 0.05$) میانگین محتوی عناصر مورد بررسی و مقادیر pH در کاربری های مختلف بر اساس نتایج آزمون های تحلیل واریانس یک طرفه و چند دامنه ای دانکن است.

نتایج بررسی تغییرات مکانی غلظت عناصر در نمونه های خاک سطحی

نتایج پراکنش مکانی محتوی عناصر در خاک سطحی (شکل ۲) نشان داد که الگوی مکانی عناصر آرسنیک، کادمیم، مس و نیکل مشابه و نقاط داغ غلظت عناصر (مناطق با بیشینه توزیع غلظت آرسنیک، کادمیم، مس و نیکل به ترتیب در دامنه ۷/۲۱-۷/۷۱، ۰/۳۰۱-۰/۳۵۶، ۳۶/۸-۳۰/۱ و ۳۱/۳-۲۸/۱) مربوط به کاربری صنعتی بوده است. در همین حال، بیشینه توزیع غلظت سرب خاک در دامنه ۲۹/۱-۳۳/۶ مربوط به مناطق تجاری بود. این موضوع افزون بر این که مؤید تاثیر فعالیت ها و کاربری های مختلف شهری بر توزیع مکانی عناصر مورد

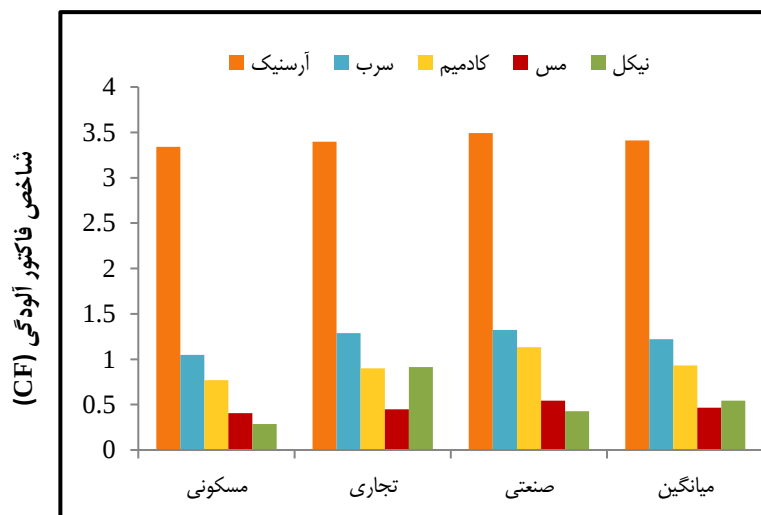
ارزیابی است، می تواند بیانگر منشا انسان پدید عناصر در منطقه مورد مطالعه باشد. از این رو، اقدامات نظارتی و کنترلی به منظور کاهش انتشار و آلودگی عناصر ضروری است. دات و همکاران (۲۰۲۳) و ایستانبلو و همکاران (۲۰۲۳) نیز با استناد به الگوی پراکنش آلودگی عناصر آرسنیک، روی، سرب، کادمیم، کبالت، کروم، مس، منگنز و نیکل در گردوغبار خیابانی هوشیمین واقع در ویتنام و سامسون واقع در ترکیه اذعان داشتند که نقاط داغ آلودگی عناصر مربوط به مناطق تجاری و صنعتی (کاربری هایی با فعالیت های شدید انسانی) بوده است (ایستانبلو و همکاران، ۲۰۲۳؛ دات و همکاران، ۲۰۲۳).



شکل ۲- پراکنش مکانی محتوی آرسنیک (الف)، سرب (ب)، کادمیم (ج)، نیکل (د) و مس (ه) در خاک سطحی همدان
نتایج محاسبه فاکتور آلودگی و شاخص بار آلودگی

برای عنصر کادمیم برابر با ۱/۲۲ و آلودگی "متوسط" خاک سطحی به این عنصر را نمایندگی کرد ($1 \leq CF < 3$). با این حال، میانگین مقادیر CF برای عناصر سرب، مس و نیکل به ترتیب برابر با ۰/۵۴۳، ۰/۹۳۳ و ۰/۴۶۶ و بیانگر آلودگی "کم" خاک سطحی به این عناصر بود ($CF < 1$). همچنین، روند نزولی میانگین مقادیر شاخص فاکتور آلودگی برای عناصر به صورت آرسنیک < کادمیم < مس < سرب < نیکل حاصل شد.

با استناد به نتایج محاسبه شاخص فاکتور آلودگی (شکل ۳)، میانگین مقادیر شاخص CF برای مناطق مسکونی، تجاری و صنعتی به ترتیب در دامنه‌های ۰/۲۳۸-۳/۸۱، ۳/۶۷-۰/۸۳۱ و ۳/۸۶-۰/۳۰۱ متغیر بوده و شرایط آلودگی "کم تا زیاد" خاک سطحی به عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل در همه مکان‌ها را نشان می‌دهند. همچنین، میانگین مقادیر CF برای عنصر آرسنیک برابر با ۳/۴۱ و بیانگر آلودگی "زیاد" خاک سطحی به این عنصر بود ($3 \leq CF < 6$). از طرفی، میانگین مقادیر CF

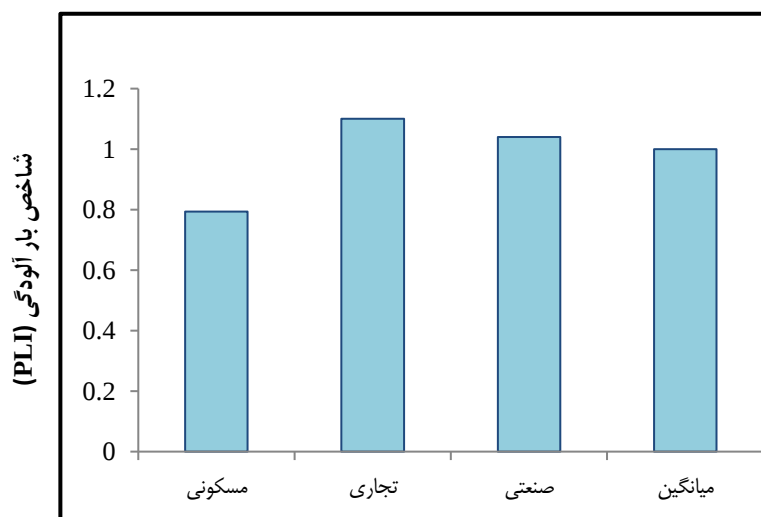


مکان نمونه برداری

شکل ۳- مقادیر شاخص CF عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل در نمونه های خاک سطحی همدان به تفکیک مکان نمونه برداری

و صنعتی با میانگین مقادیر شاخص به ترتیب برابر با ۱/۱۰ و ۱/۰۴ آلودگی "متوسط" را نشان دادند ($1 \leq \text{PLI} < 2$). از طرفی، مقادیر میانگین شاخص PLI برابر با ۱/۰۰ و نشان دهنده سطح آلودگی "متوسط" خاک سطحی در منطقه مورد مطالعه بود.

نتایج محاسبه شاخص بار آلودگی عناصر مورد مطالعه در نمونه های خاک سطحی در شکل ۴ آورده شده است. با استناد به نتایج، مقادیر محاسبه شده شاخص PLI نمونه های خاک سطحی در کاربری مسکونی برابر با ۰/۷۹۳ و نشان دهنده آلودگی "کم" نمونه ها بود ($\text{PLI} < 1$). در همین حال، نمونه های خاک سطحی در کاربری های تجاری



مکان نمونه برداری

شکل ۴- مقادیر شاخص PLI عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل در نمونه های خاک سطحی شهر همدان به تفکیک مکان نمونه برداری

با استناد به نتایج محاسبه فاکتور آلودگی می‌توان اذعان داشت که مقادیر CF عناصر مورد ارزیابی در خاک ارتباط مستقیم با محتوی عناصر در کاربری‌های مختلف دارد. همچنین، تغییرات مکانی مقادیر شاخص‌های آلودگی و بیشینه میانگین مقادیر CF و PLI در مناطق تجاری و صنعتی نشان داد که فعالیت‌های شهری به‌ویژه انتشارات ترافیکی و صنعتی به احتمال زیاد تأثیر قابل‌توجهی بر آلودگی عناصر بالقوه سمی به‌ویژه آرسنیک در خاک سطحی شهر همدان داشته است. در این خصوص، روی و همکاران (۲۰۲۳) نیز سطح آلودگی عناصر روی، سرب، کادمیم، کروم و مس در خاک سطحی شهر چنای، هند را "خیلی زیاد" و ناشی از فعالیت‌های انسان‌پدید (ترافیک و صنعت) گزارش کردند. از طرفی، لی و همکاران (۲۰۲۴) با ارزیابی آلودگی و منشایی عناصر بالقوه سمی در خاک‌های سطحی شهر واحه، چین، اذعان داشتند که افزایش آلودگی عناصر آرسنیک، روی، سرب، کادمیم، کروم، مس و نیکل در مناطقی با فعالیت‌های انسانی شدید به‌طور عمده ناشی از انتشارات ترافیکی، صنعتی و احتراق سوخت فسیلی بوده است.

نتایج محاسبه سمیت محیطی و زیستی احتمالی عناصر

نتایج محاسبه مقادیر سمیت محیطی و زیستی احتمالی عناصر مورد ارزیابی در نمونه‌های خاک سطحی در جدول ۳ آورده شده است. میانگین مقادیر شاخص mERM-Q برای مناطق مسکونی، تجاری و صنعتی به‌ترتیب برابر با ۰/۱۲۱، ۰/۱۵۲ و ۰/۱۵۹ و بیان‌گر سمیت محیطی متوسط خاک سطحی در همه مکان‌های نمونه‌برداری (۱۰۰٪ نمونه‌ها) بود $mERM-Q \leq 0/500$ ($< 0/100$). در همین حال، میانگین مقادیر شاخص mERM-Q برابر با ۰/۱۴۴ و احتمال سمیت محیطی خاک سطحی به‌میزان ۲۱٪ در منطقه مورد مطالعه را نمایندگی کرد. از سوی دیگر، نمونه‌های خاک سطحی در کاربری‌های

مسکونی، تجاری و صنعتی با میانگین مقادیر شاخص mPEL-Q به‌ترتیب برابر با ۰/۲۳۴، ۰/۲۹۲ و ۰/۲۹۷ سمیت زیستی "متوسط" را نشان دادند ($0/500 \leq mPEL-Q < 0/100$). همچنین، مقادیر شاخص mPEL-Q برابر با ۰/۲۷۴ و بیان‌گر احتمال سمیت زیستی خاک سطحی به‌میزان ۲۱٪ در منطقه مورد مطالعه بود. یافته‌های به‌دست آمده، افزون بر این که نشان‌دهنده مخاطره محیط‌زیستی برای زیست‌مندان است، آلودگی خاک سطحی شهری به عناصر مورد ارزیابی را نیز تأیید کرده و احتمالاً می‌تواند حاکی از کاهش کیفیت خاک شهری در آینده باشد. حسینی و سبجان اردکانی (۱۴۰۱) نیز با ارزیابی آلودگی عناصر بالقوه سمی در خاک سطحی حاشیه برخی جاده‌های شهر همدان و با استناد به مقادیر میانگین mERM-Q و mPEL-Q گزارش کردند که سطح سمیت محیطی و زیستی برای عناصر سرب، کادمیم، کروم و نیکل "متوسط" بوده است. از طرفی، لیو و همکاران (۲۰۲۳) با استناد به میانگین مقادیر شاخص mERM-Q در خاک سطحی یوننان (چین) احتمال سمیت محیطی عناصر آرسنیک، روی، سرب، کادمیم و مس را برابر با ۴۹٪ و در سطح "زیاد" گزارش کردند.

به‌طور کلی، نظر به بیشینه محتوی، آلودگی و سمیت عناصر مورد مطالعه در کاربری‌های صنعتی و تجاری، افزایش غلظت این عناصر در آینده می‌تواند به‌عنوان تهدید بالقوه مضر برای سلامت بوم‌سازگان و شهروندان منجر به بروز تهدیدات بوم‌شناختی و سلامتی شود. در این خصوص، احتمال افزایش جذب آلاینده‌های فلزی-شبه‌فلزی می‌تواند به‌طور مستقیم و از طریق بلع خاک، استنشاق ذرات خاک و تماس پوستی اثرات بالقوه مهم و نامطلوب بر سلامت ساکنان به‌ویژه کودکان برجای گذارد. از این‌رو، اقدامات کنترلی و تمهیدات مدیریتی به‌منظور کاهش انتشار و اثرات نامطلوب محیط‌زیستی-بهداشتی عناصر مورد مطالعه ضروری است.

جدول ۳- نتایج ارزیابی سمیت محیطی و زیستی (mERM-Q و mPEL-Q) عناصر مورد مطالعه در نمونه‌های خاک سطحی شهر همدان

شاخص	مسکونی	تجاری	صنعتی	میانگین
میانگین ضریب متوسط حدود اثر (mERM-Q)	۰/۱۲۱	۰/۱۵۲	۰/۱۵۹	۰/۱۴۴
میانگین ضریب سطح احتمالی اثر (mPEL-Q)	۰/۲۳۴	۰/۲۹۲	۰/۲۹۷	۰/۲۷۴

نتیجه گیری

در این پژوهش، محتوی، تغییرات مکانی، آلودگی و سمیت عناصر بالقوه سمی (آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل) خاک سطحی کلان شهر همدان ارزیابی شد. با استناد به نتایج حاصل، نمونه‌های خاک سطحی برداشت شده از کاربری‌های واجد فعالیت‌های انسانی شدید (تجاری و صنعتی)، از بیشینه محتوی عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل برخوردار بودند که تاثیر منابع انسان‌پدید نظیر حمل‌ونقل، آبکاری و جوشکاری فلزات، تولید محصول‌های چرمی، پلاستیکی، همچنین کارگاه‌های نقاشی و تعمیرات خودرو در آلودگی خاک را تأیید می‌کند. از طرفی، نتایج محاسبه شاخص CF نشان داد که آلودگی عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل در منطقه مورد مطالعه در محدوده "کم" تا "زیاد" متغیر بوده و از روند کاهشی آرسنیک < کادمیم < مس < سرب < نیکل تبعیت کرده است. همچنین، میانگین مقادیر شاخص PLI نمونه‌های خاک سطحی نیز با ۱/۰۰، شرایط آلودگی "متوسط" در منطقه مورد مطالعه را نشان داد. به علاوه، مقادیر محاسبه شده شاخص‌های mERM-Q و mPEL-Q برای عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل سمیت محیطی و زیستی "متوسط" را نمایندگی کردند. یافته‌ها به

عنوان داده‌های مرجع اولیه، افزون بر این که می‌توانند مبنایی برای ارزیابی روندهای آتی و سرنوشت آلاینده‌های فلزی در خاک شهری محسوب شوند، لزوم توجه و ارائه تمهیدات و اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی برای کاهش سطح آلودگی انسان‌پدید به‌ویژه در کاربری با سطوح آلودگی زیاد را نیز تأیید می‌کنند. در این خصوص، بهینه‌سازی و بهبود سیاست‌ها و راهبردهای مدیریت و کنترل حمل‌ونقل شهری و زیرساخت‌های صنعتی برای کاهش آلودگی و حفظ سلامت زیست‌بوم شهری موثر خواهد بود. همچنین، نظر به این که عنصر آرسنیک از بیش‌ترین سطوح آلودگی برخوردار بود؛ لذا، نسبت به کنترل منابع انتشار این عنصر از جمله احتراق سوخت فسیلی و در همین حال پایش منظم و دوره‌ای نمونه‌های خاک سطحی به‌ویژه در مناطقی با سطح آلودگی زیاد توصیه می‌شود. در نهایت، از آنجا که اجرای این پژوهش با محدودیت‌های زمانی و منابع مالی مواجه بود، مطالعه سایر عناصر بالقوه سمی و ارزیابی ریسک‌های بهداشتی و بوم‌شناختی آن‌ها می‌تواند برای حفظ سلامت شهروندان و زیست‌بوم شهری می‌تواند مفید واقع شود.

فهرست منابع

۱. حسینی، ن. و س. سبحان اردکانی. ۱۴۰۰. ارزیابی اثر حجم ترافیک بر آلودگی و خطر بالقوه بوم‌شناختی عناصر روی، سرب و نیکل در خاک‌های حاشیه برخی جاده‌های برون شهری همدان. *پژوهش‌های خاک*، (۲): ۱۱۹-۱۳۴.
۲. حسینی، ن. و س. سبحان اردکانی. ۱۴۰۱. ارزیابی آلودگی و خطر بالقوه بوم‌شناختی عناصر سرب، کادمیم، کروم و نیکل در خاک سطحی حاشیه برخی جاده‌های کلان‌شهر همدان. *فصلنامه مهندسی بهاد/شت محیط*، ۹(۳): ۳۴۹-۳۶۴.
۳. حسینی، ن. و س. سبحان اردکانی. ۱۴۰۲. ارزیابی محتوی و منشأ آلودگی فلزات سنگین در خاک سطحی حاشیه جاده: مطالعه موردی. *فصلنامه پژوهش در بهاد/شت محیط*، ۹(۲): ۱۹۷-۲۱۴.
۴. سبحان اردکانی، س. و ن. حسینی. ۱۴۰۲a. بررسی آلودگی و مخاطره سلامت برخی عناصر بالقوه سمی در خاک سطحی محیط کنار جاده‌ای. *تحقیقات کاربردی خاک*، ۱۱(۴): ۱۱۲-۱۲۵.
۵. سبحان اردکانی، س. و ن. حسینی. ۱۴۰۲b. ارزیابی سمیت و خطر سلامت مرتبط با عناصر بالقوه سمی (روی، سرب، کادمیم و کروم) خاک حاشیه جاده ای شهر همدان. *محیط شناسی*، ۴۹(۱): ۷۱-۹۰.
۶. عظیم زاده، ب. و ح. خادمی. ۱۳۹۲. تخمین غلظت زمینه برای ارزیابی آلودگی برخی فلزات سنگین در خاک‌های سطحی بخشی از استان مازندران. *آب و خاک*، ۲۷(۳): ۵۴۸-۵۵۹.
7. Adimalla, N., Chen, J. and Qian, H. 2020. Spatial characteristics of heavy metal contamination and potential human health risk assessment of urban soils: A case study from an urban region of South India. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 194: 110406.
8. Bernardino, C. A., Mahler, C. F., Santelli, R. E., Freire, A. S., Braz, B. F. and Novo, L. A. 2019. Metal accumulation in roadside soils of Rio de Janeiro, Brazil: impact of traffic volume, road age, and urbanization level. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(3): 156.
9. Bineshpour, M., Payandeh, K., Nazarpour, A. and Sabzalipour, S. 2021. Status, source, human health risk assessment of potential toxic elements (PTEs), and Pb isotope characteristics in urban surface soil, case study: Arak city, Iran. *Environmental Geochemistry and Health*, 43: 4939-4958.
10. Cai, L. M., Jiang, H. H. and Luo, J. 2019. Metals in soils from a typical rapidly developing county, Southern China: levels, distribution, and source apportionment. *Environmental Science and Pollution Research*, 26: 19282-19293.
11. Cai A, Zhang, H., Zhao, Y., Wang, X., Wang, L. and Zhao, H. 2022. Quantitative source apportionment of heavy metals in atmospheric deposition of a typical heavily polluted city in Northern China: Comparison of PMF and UNMIX. *Frontiers in Environmental Science*, 10: 950288.
12. Dat, N. D., Nguyen, V. T., Vo, T. D. H., Bui, X. T., Bui, M. H., Nguyen, L. S. P., Tran, A. T. K., Nguyen, T. T. A., Ju, Y. R. and Huynh, T. M. T. 2021. Contamination, source attribution, and potential health risks of heavy metals in street dust of a metropolitan area in Southern Vietnam. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(36): 50405-50419.
13. Dong, C., Zhang, H., Yang, H., Wei, Z., Zhang, N. and Bao, L. 2023. Quantitative Source Apportionment of Potentially Toxic Elements in Baoshan Soils Employing Combined Receptor Models. *Toxics*, 11(3): 268.

14. Goncharov, G., Soktoev, B., Farkhutdinov, I. and Matveenkov, I. 2024. Heavy metals in urban soil: contamination levels, spatial distribution and human health risk assessment (the case of Ufa city, Russia). *Environmental Research*, 257 (15): 119216.
15. Gopal, V., Krishnamurthy, R. R., Indhumathi, A., Sharon, B. T., Priya, T. D., Rathinavel, K., Manikanda Bharath, K., Magesh, N. S. and Ayyamperumal, R. 2024. Geochemical evaluation, ecological and human health risk assessment of potentially toxic elements in urban soil, southern India. *Environmental Research*, 248: 118413.
16. Gujre, N., Mitra, S., Soni, A., Agnihotri, R., Rangan, L., Rene, E. R. and Sharma, M. P. 2021. Speciation, contamination, ecological and human health risks assessment of heavy metals in soils dumped with municipal solid wastes. *Chemosphere*, 262: 128013.
17. Hakanson, L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research*, 14(8): 975-1001.
18. Haghazadeh, H., Hudson-Edwards, K. A., Kumar, V., Pourakbar, M., Mahdavianpour, M. and Aghayani, E. 2021. Potentially toxic elements contamination in surface sediment and indigenous aquatic macrophytes of the Bahmanshir River, Iran: Appraisal of phytoremediation capability. *Chemosphere*, 285: 131446.
19. Hoshyari, E., Hassanzadeh, N., Keshavarzi, B., Jaafarzadeh, N. and Rezaei, M. 2023. Spatial distribution, source apportionment, and ecological risk assessment of elements (PTEs, REEs, and ENs) in the surface soil of Shiraz City (Iran) under different land-use types. *Chemosphere*, 311: 137045.
20. Hosseini, N. S., Sobhanardakani, S., Cheraghi, M., Lorestani, B. and Merrikhpour, H. 2020. Heavy metal concentrations in roadside plants (*Achillea wilhelmsii* and *Cardaria draba*) and soils along some highways in Hamedan, west of Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 27: 13301-13314.
21. Hosseini, N. S., Sobhanardakani, S., Cheraghi, M., Lorestani, B. and Merrikhpour, H. 2022. Expansive herbaceous species as bio-tools for elements detection in the vicinity of major roads of Hamedan, Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(3): 1611-1624.
22. Hosseini, N.S. and Sobhanardakani, S. 2024. Concentration, sources, potential ecological and human health risks assessment of trace elements in roadside soil in Hamedan metropolitan, west of Iran. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 104(17): 5962–5985.
23. Istanbulu, S. N., Sevik, H., Isinkaralar, K. and Isinkaralar, O. 2023. Spatial distribution of heavy metal contamination in road dust samples from an urban environment in Samsun, Türkiye. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 110(4): 78.
24. Jahandari, A., Abbasnejad, A. and Jamasb, R. 2020. Concentration, likely sources, and ecological risk assessment of potentially toxic elements in urban soils of Shiraz City, SW Iran: a preliminary assessment. *Arabian Journal of Geosciences*, 13: 1-10.
25. Jiang, Y., Chao, S., Liu, J., Yang, Y., Chen, Y., Zhang, A. and Cao, H. 2017. Source apportionment and health risk assessment of heavy metals in soil for a township in Jiangsu Province, China. *Chemosphere*, 168: 1658-1668.
26. Kaghazchi, M. E. and Soleimani, M. 2023. Changes in ecological and health risk assessment indices of potentially toxic elements associated with ambient air particulate matters (PM_{2.5}) in response to source, land use and temporal variation in Isfahan city, Iran. *Urban Climate*, 49: 101520.
27. Konstantinova, E., Minkina, T., Nevidomskaya, D., Lychagin, M., Bezberdaya, L., Burachevskaya, M., Rajput, V.D., Zamulina, I., Bauer, T. and Mandzhieva, S. 2024. Potentially toxic elements in urban soils of the coastal city of the Sea of

- Azov: Levels, sources, pollution and risk assessment. *Environmental Research*, 252: 119080.
28. Lee, J. I., Lee, C. H., Lee, C. G., Choi, N. C. and Park, S. J. 2025. Evaluating the potential of remediated dredged sediments as a growth medium for landscape plants: Effects of soil amendments and heavy metal uptake. *International Journal of Sediment Research*. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2025.07.012>.
 29. Li, Y., Xu, Z., Ren, H., Wang, D., Wang, J., Wu, Z. and Cai, P. 2022. Spatial distribution and source apportionment of heavy metals in the Topsoil of Weifang City, East China. *Frontiers in Environmental Science*, 10: 893938.
 30. Li, J., Liu, J. Z., Tai, X. S., Jiao, L., Zhang, M. and Zang, F. 2024. Pollution and source-specific risk analysis of potentially toxic metals in urban soils of an oasis-tourist city in northwest China. *Environmental Geochemistry and Health*, 46(2): 1-20.
 31. Liu, X., Chi, H., Tan, Z., Yang, X., Sun, Y., Li, Z., Hu, K., Hao, F., Liu, Y., Yang, S., Deng, Q. and Wen, X. 2023. Heavy metals distribution characteristics, source analysis, and risk evaluation of soils around mines, quarries, and other special areas in a region of northwestern Yunnan, China. *Journal of Hazardous Materials*, 458: 132050.
 32. Men, C., Liu, R., Wang, Q., Guo, L., Miao, Y. and Shen, Z. 2019. Uncertainty analysis in source apportionment of heavy metals in road dust based on positive matrix factorization model and geographic information system. *Science of the Total Environment*, 652: 27.
 33. Neina, D. 2019. The role of soil pH in plant nutrition and soil remediation. *Applied and Environmental Soil Science*, 2019(1): 5794869.
 34. Oyebamiji, A. O., Olaolorun, O. A., Popoola, O. J. and Zafar, T. 2024. Assessment of heavy metal pollution in soils of Jebba Area, Nigeria: Concentrations, source analysis and implications for ecological and human health risks. *Science of the Total Environment*, 945: 173860.
 35. Pilková, Z., Filová, L., Hiller, E. and Mihaljevič, M. 2024. Re-Interpretation of metal (loid) concentrations in urban soils of two different land uses by positive matrix factorisation. *Environmental Forensics*, 25(6): 626–644.
 36. Roy, P. D., Sundar, S., Usha, T., Gowrappan, M., V, P. K., Periyasamy, R., Jonathan, M. P. and Chokkalingam, L. 2023. Pollution assessment with respect to five heavy metals in urban soils of the greater Chennai Region, southeast coast of India. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(2): 63.
 37. Sabet Aghlidi, P., Cheraghi, M., Lorestani, B., Sobhanardakani, S. and Merrikhpour, H. 2020. Analysis, spatial distribution and ecological risk assessment of arsenic and some heavy metals of agricultural soils, case study: South of Iran. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 18(2): 665-676.
 38. Siddig, M. M., Asabere, S. B., Al-Farraj, A. S., Brevik, E. C. and Sauer, D. 2025. Pollution and ecological risk assessment of heavy metals in anthropogenically-affected soils of Sudan: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 17: 100601.
 39. Singh, M. P., Bhattacharyya, S., Chinu, K., Akter, R. and Marjo, C. E. 2025. Comprehensive chemical profiling of roadside soil and road dust of Delhi, India: Estimation of health risk and city fuel consumption. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 18: 100668.
 40. Tomlinson, D. L., Wilson, J. G., Harris, C. R. and Jeffrey, D. W. 1980. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgoländer meeresuntersuchungen*, 33: 566-575.

41. Upadhyay, V., Kumari, A. and Kumar, S. 2024. From soil to health hazards: Heavy metals contamination in northern India and health risk assessment. *Chemosphere*, 354: 141697.
42. Wang, S., Cai, L. M., Wen, H. H., Luo, J., Wang, Q. S. and Liu, X. 2019. Spatial distribution and source apportionment of heavy metals in soil from a typical county-level city of Guangdong Province, China. *Science of the Total Environment*, 655: 92-101.
43. Wang, Z., Lu, X., Yu, B., Yang, Y., Wang, L. and Lei, K. 2023. Ascertaining priority control pollution sources and target pollutants in toxic metal risk management of a medium-sized industrial city. *Science of the Total Environment*, 887: 164022.
44. Wang, P., Han, G., Hu, J., Zhang, Q., Tian, L., Wang, L., Liu, T., Ma, W., Li, J. and Zheng, H. 2024. Remarkable contamination characteristics, potential hazards and source apportionment of heavy metals in surface dust of kindergartens in a northern megacity of China. *Journal of Hazardous Materials*, 465: 133295.
45. Yin, J., Wu, X., Li, S., Li, C. and Guo, Z. 2020. Impact of environmental factors on gastric cancer: a review of the scientific evidence, human prevention and adaptation. *Journal of Environmental Sciences*, 89: 65-79.

ارزیابی برخی ویژگی‌های خاک باغ‌های سیب با استفاده از رویکرد شاخص ارزش غذایی (NIV)

عزیز مجیدی* 

دانشیار پژوهشی، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج

کشاورزی، ارومیه، ایران. A.majidi@areeo.ac.ir

«مقاله پژوهشی»

دریافت: ۱۴۰۴/۴/۱۰ و پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۳۱

چکیده

ارزیابی ویژگی‌های خاک باغ‌های سیب، برای درک سلامت خاک و پتانسیل تولیدی آن بسیار مهم است. این پژوهش به منظور ارزیابی برخی از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و حاصلخیزی خاک باغ‌های سیب استان آذربایجان غربی با استفاده از روش شاخص ارزش غذایی (NIV) انجام شد. نمونه‌ها از ۱۴۸ نقطه مختلف، هر کدام از عمق ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متری یک باغ سیب جمع‌آوری شدند. نمونه‌ها از نظر توزیع اندازه ذرات، درصد اشباع (SP)، پهاش (pH)، هدایت الکتریکی (EC)، کربنات کلسیم معادل (CCE)، کربن آلی (OC)، فسفر قابل جذب (P_{ava}) و پتاسیم قابل جذب (Kava) مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفتند. نتایج نشان داد که ۷۵٪ خاک‌های مزبور در شرایط قلیایی متوسط تا زیاد با مقدار کربنات کلسیم معادل متوسط تا زیاد (۸۹/۵٪) بودند. نیز، ۷۵٪ نمونه‌ها از نظر کربن آلی خاک در محدوده تا ۱/۱۳-۰/۹٪ قرار داشتند. در ۵۰٪ خاک‌ها، فسفر قابل جذب کمتر از ۲/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم (کلاس پایین) و در ۵۰٪ بقیه، فسفر در شرایط بهینه تا زیاد (بیش از ۵/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود. در بیش از ۲۵٪ از خاک‌ها محتوای پتاسیم قابل جذب در حد پایین (۱۴۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود و بیش از ۷۵٪ از آن‌ها در کلاس متوسط تا بالا قرار داشت. به‌طور کلی، ۹۳/۷٪، ۹۳٪، ۸۵/۵٪، ۸۹/۵٪، ۹۸/۶٪، ۹۵/۹٪ و ۸۳/۴٪ به ترتیب برای ویژگی‌های EC، pH، CCE، OC، P_{ava} و Kava خاک در کلاس‌های بالای NIV قرار گرفتند؛ بنابراین، خاک‌های منطقه از ویژگی‌های نسبتاً مطلوبی برای رشد درختان سیب برخوردار بوده و با مدیریت صحیح باغ، تولید سیب باکیفیت مطلوبی قابل‌دستیابی است.

واژه‌های کلیدی: خاک‌های آهکی، پتانسیل تولیدی خاک، حاصلخیزی خاک.

* -آدرس ایمیل نویسنده مسئول: A.majidi@areeo.ac.ir

استناد: مجیدی، ع.، ۱۴۰۴. ارزیابی برخی ویژگی‌های خاک باغ‌های سیب با استفاده از رویکرد شاخص ارزش غذایی (NIV). مقاله پژوهشی، نشریه پژوهش‌های خاک، (۲) ۳۹، ص ۲۰۵-۲۲۰.



مقدمه

باغ‌های سیب در ایران، به‌ویژه در استان آذربایجان غربی، از اهمیت اقتصادی بالایی برخوردارند. درختان سیب برای تأمین آب و مواد غذایی موردنیاز خود به خاک وابسته هستند. بررسی‌ها نشان داده است که ویژگی‌های خاک، نقش اساسی در رشد، نمو و عملکرد درختان سیب ایفا می‌کنند (محمدی و همکاران، ۱۳۹۸). مطالعه ویژگی‌های خاک باغ‌های سیب، ازجمله مراحل اساسی در مدیریت پایدار و بهینه باغ است (یانگ و همکاران، ۲۰۲۰؛ مارشنر، ۲۰۱۲). خاک سالم و حاصلخیز زمینه‌ساز رشد بهتر درختان، مقاومت در برابر آفات و بیماری‌ها و تولید میوه‌های باکیفیت بالاتر است (کوچوک‌دونمزر و همکاران، ۲۰۲۵). از طرفی، عدم توجه به ویژگی‌های خاک منجر به کاهش عملکرد، مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی و برهم خوردن تعادل عناصر غذایی، آلودگی منابع آب و افزایش هزینه‌های تولید می‌شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۴).

مطالعات اخیر نشان داده‌اند که درختان سیب به‌ویژه در خاک‌های با pH قلیایی و مقادیر بالای کربنات کلسیم، با محدودیت دسترسی به عناصر غذایی مواجه هستند. این شرایط می‌تواند تأثیری منفی بر جذب فسفر و سایر عناصر غذایی داشته باشد. (وانگ و لی، ۲۰۲۳). علاوه بر ویژگی‌های شیمیایی، خصوصیات فیزیکی خاک نیز نقش مهمی در ارزیابی حاصلخیزی خاک ایفا می‌کنند. مطالعات نشان داده‌اند که با افزایش سال‌های کاشت علف‌های طبیعی در باغ‌های سیب، میزان ماده آلی خاک افزایش یافته و درنتیجه، ظرفیت نگهداری آب و عناصر غذایی بهبود می‌یابد. این تغییرات مثبت در خصوصیات فیزیکی خاک می‌تواند منجر به بهبود وضعیت تغذیه‌ای درختان سیب شود (وانگ و همکاران، ۲۰۲۳). در زمینه مدیریت تغذیه‌ای، استفاده از کودهای آلی و معدنی به‌صورت ترکیبی، به‌ویژه در خاک‌های با سطح پایین

ماده آلی، می‌تواند تأثیر مثبتی بر وضعیت تغذیه‌ای درختان سیب داشته باشد. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از ترکیب کودهای NPK همراه با کودهای آلی مانند کود دامی پوسیده، می‌تواند موجب افزایش جذب عناصر غذایی و بهبود عملکرد درختان سیب شود (من و همکاران، ۲۰۲۳).

در سال‌های اخیر، ارزیابی ویژگی‌های خاک باغ‌های سیب با استفاده از شاخص ارزش غذایی (NIV^۱) به‌عنوان ابزاری مؤثر در مدیریت تغذیه‌ای و بهبود حاصلخیزی خاک موردتوجه پژوهشگران قرارگرفته است. این رویکرد به‌ویژه در خاک‌های آهکی و مناطق نیمه‌خشک که با چالش‌های تغذیه‌ای مواجه هستند، کاربرد فراوانی دارد (زاهری عبدهوند، ۲۰۲۲). در تحقیقی در چین، با استفاده از شاخص ارزش غذایی، وضعیت تغذیه‌ای خاک باغ‌های سیب در پنج منطقه عمده تولید سیب بررسی شد. نتایج نشان داد که در بیشتر باغ‌ها کمبودهایی در عناصر کم‌مصرف مانند روی و مس وجود دارد. این مطالعه بر لزوم توجه به کمبود عناصر کم‌مصرف و تنظیم برنامه‌های تغذیه‌ای متناسب با نیاز درختان تأکید دارد (من و همکاران، ۲۰۲۳). دورخوشان (۲۰۲۲) خاک باغ‌های سیب متراکم^۲ در عمق‌های ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی-متری را از نظر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی با استفاده از رویکرد شاخص ارزش غذایی بررسی کرده و مشاهده کرد که باغ‌های موردبررسی از نظر عناصر پرمصرف نیتروژن، فسفر، پتاسیم و گوگرد در محدوده متوسط تا بالا قرار داشتند. همچنین در بین عناصر کم‌مصرف نیز تنها عنصر روی مواجه با کمبود بود. مقادیر شاخص ارزش غذایی برای عنصر نیتروژن در شرایط متوسط و برای عنصر روی در محدوده ۱/۵-۱/۲ گزارش شدند. در این پژوهش مشخص شد که این شاخص ارزیابی، می‌تواند به بهینه‌سازی برنامه تغذیه‌ای باغ‌های سیب کمک کند. آداک و پندی (۲۰۲۰) در تحقیقی که با استفاده از شاخص ارزش غذایی انجام گرفت، گزارش کردند که کربن آلی خاک، نیتروژن کل و پتاسیم

^۲ High Density^۱ Nutrient Index Value

ارائه راهکارهای مدیریتی مبتنی بر نتایج شاخص مذکور برای بهبود تولید و پایدار سیب اجرا شد.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و ارزیابی برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک باغ‌های سیب

برای ارزیابی ویژگی‌های خاک، تعداد ۱۴۸ نمونه مرکب از دو عمق ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متری خاک از باغ‌های منتخب در شهرستان‌های سلماس (۴۴ نمونه)، ارومیه (۴۹ نمونه)، مهاباد (۴۴ نمونه)، اشنویه (چهار نمونه) و میاندوآب (پنج نمونه) در طی سال‌های ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ تهیه شد. نمونه‌های خاک هوا خشک و آسیاب گردیدند و سپس از الک‌های ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. بعد از آماده‌سازی نمونه‌ها، برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل؛ بافت خاک (به روش هیدرومتر)، pH، گل اشباع، هدایت الکتریکی، عصاره‌ی اشباع، کربن آلی به روش دی کرومات پتاسیم، فسفر قابل جذب به روش اولسن و پتاسیم قابل جذب با روش استات آمونیوم یک نرمال اندازه‌گیری شدند. کربنات کلسیم معادل نیز به روش تیتراسیون اندازه‌گیری شد. همه اندازه‌گیری‌ها مطابق روش‌های استاندارد توصیه‌شده توسط موسسه تحقیقات خاک و آب اندازه‌گیری شدند (شهبازی و همکاران، ۱۴۰۳).

برای ارزیابی وضعیت خاک، ابتدا ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در سه کلاس کم، متوسط و زیاد گروه‌بندی شدند. تمامی داده‌های ویژگی‌های خاک با استفاده از دو روش گومز (گومز و گومز، ۱۹۸۴) و مرسوم (قائمیان، ۱۳۸۸) در سه کلاس کم، متوسط و زیاد کلاس‌بندی شدند. برای کلاس‌بندی داده‌های کمی در روش گومز از دو پارامتر آماری میانگین ($\bar{M}$) و انحراف معیار (SD) استفاده شد. برای این منظور هر کدام از ویژگی‌های خاک به کمک روابط زیر و با استفاده از پارامترهای مذکور در سه کلاس کم، متوسط و زیاد

قابل جذب خاک در وضعیت کمبود، فسفر قابل جذب خاک و عناصر کم‌مصرف روی، آهن و منگنز در وضعیت کفایت و عنصر مس در وضعیت کمبود قرار داشته و وضعیت حاصلخیزی خاک تأثیر مستقیمی بر میزان محصول باغ می‌گذارد. در این پژوهش چنین نتیجه‌گیری شد که کمبود عناصر غذایی در بیشتر باغ‌ها به‌طور مستقیم به کاهش بهره‌وری و پتانسیل تولیدی باغ می‌انجامد که نیازمند مدیریت هدفمند تغذیه بهینه است. آداک و همکاران (۲۰۱۹) با مطالعه باغ‌های انبه با استفاده از شاخص ارزش غذایی، نشان دادند که بیشتر عناصر در محدوده پایین تا متوسط بودند. عناصر روی و مس در بیشتر مناطق در محدوده کمبود و عناصر آهن و منگنز نیز غالباً در محدوده پایین یا متوسط بودند. مطالعات انجام‌شده در باغ‌های سیب با تراکم بالا با شاخص ارزش غذایی در کشمیر نشان داد که عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم قابل جذب خاک به ترتیب در محدوده ۲/۵-۲/۲، ۲/۳-۱/۷، ۲/۴۵-۲/۱ و سایر عناصر غذایی شامل گوگرد، آهن، مس، روی و منگنز به ترتیب در محدوده‌های ۲/۰۵-۱/۷، ۲/۶-۲/۵، ۲/۳۵-۱/۹۵، ۱/۵-۱/۲ و ۲/۹-۲/۷ بودند. نتیجه این تحقیق نشان داد که حاصلخیزی خاک باغ‌ها از نظر قابلیت جذب عناصر غذایی در شرایط بهینه و فقط از نظر مقدار روی قابل جذب خاک مواجه با کمبود بود (مسرت، ۲۰۱۹).

پژوهش‌های به انجام رسیده مبین این است که استفاده از شاخص ارزش غذایی، می‌تواند در ارزیابی دقیق وضعیت تغذیه‌ای خاک باغ‌های سیب کمک کند. این رویکرد با ارائه تصویری جامع از ویژگی‌های مختلف خاک، امکان اتخاذ تصمیمات مدیریتی مؤثرتر در جهت بهبود حاصلخیزی خاک و افزایش تولید پایدار سیب را فراهم می‌آورد. بر این اساس، این تحقیق با اهداف (۱) ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و حاصلخیزی خاک به‌منظور شناخت شرایط رشدی بهینه خاک در باغ‌های سیب استان آذربایجان غربی با استفاده از شاخص ارزش غذایی، (۲) تحلیل وضعیت تغذیه‌ای خاک و شناسایی محدودیت‌های موجود در جذب عناصر غذایی و

گروه‌بندی شدند. روابط مورد استفاده در روش گومز منطبق بر موارد ذیل بود.

ارائه‌شده توسط پارکر و همکاران (۱۹۵۱) محاسبه شد (رابطه ۴).

$$\text{رابطه (۴)} \quad NIV = \frac{(1 \times N_{Low} + 2 \times N_{Medium} + 3 \times N_{High})}{N_{Low} + N_{Medium} + N_{High}}$$

در این رابطه، NIV ارزش شاخص ویژگی خاک مورد مطالعه، N_{Low} تعداد نمونه‌های خاک در کلاس کم، N_{Medium} تعداد نمونه در کلاس متوسط یا بهینه و N_{High} تعداد نمونه در کلاس زیاد می‌باشند. بر مبنای روش فوق، مقادیر محاسبه‌شده NIV کمتر از ۱/۶۷ بیانگر وضعیت کمبود، مقادیر محاسبه‌شده در محدوده ۱/۶۷ تا ۲/۳۳ مبین وضعیت بهینه و مقادیر بیشتر از ۲/۳۳ وضعیت بیش‌بود یا زیادی را در خاک نشان می‌دهند (جدول ۱).

$$\text{رابطه (۱) کم} \quad M_i \leq \bar{M} - SD$$

$$\text{رابطه (۲) متوسط} \quad \bar{M} - SD < M_i < \bar{M} + SD$$

$$\text{رابطه (۳) زیاد} \quad M_i \geq \bar{M} + SD$$

در این روابط، M_i : مقدار کمی ویژگی خاک، $\bar{M}$: میانگین ویژگی خاک در جامعه مورد مطالعه، و SD : انحراف معیار ویژگی‌های خاک در جامعه مورد مطالعه است. پس از کلاس‌بندی ویژگی‌های خاک، ارزش شاخص عناصر غذایی برای هر کدام از ویژگی‌های خاک، با استفاده از روش

جدول ۱- ارزش مقدارهای شاخص عناصر غذایی و تفسیر آن

کلاس شاخص عنصر غذایی	ارزش	تفسیر
I	< ۱/۶۷	کمبود
II	۱/۶۷-۲/۳۳	کفایت
III	> ۲/۳۳	بیشبود

نتایج و بحث

روند تغییرات ویژگی‌های خاک در باغ‌های مورد مطالعه

تجزیه نمونه‌های خاک نشان داد که از بین تمامی ویژگی‌های خاک فقط دو ویژگی درصد رس و پتاسیم قابل جذب دارای توزیع نرمال نبودند (جدول ۲). میانگین هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک ۰/۵۹ دسی‌زیمنس بر متر با انحراف معیار ۰/۲۰ بود که در محدوده ۰/۱۷-۲/۵۶ متغیر بود. قابلیت هدایت الکتریکی در ۵۰ درصد نمونه‌ها کمتر از ۰/۵۵ دسی‌زیمنس بر متر و در ۷۵ درصد آن‌ها کمتر

از ۰/۶۷ دسی‌زیمنس بر متر بود؛ بنابراین، تمامی خاک‌های تحت کشت باغ‌های سیب مناطق مورد مطالعه در شرایط غیر شور قرار داشتند (جدول ۲). میانگین pH خاک در باغ‌های مورد مطالعه معادل ۷/۹۷ (قلیائی) و انحراف معیار ۰/۲ بود. طبق نتایج، ۲۵ درصد باغ‌های مورد مطالعه pH کمی قلیایی و ۷۵ درصد در شرایط قلیایی متوسط تا زیاد بودند. کمترین ضریب تغییرات در بین ویژگی‌های خاک در ویژگی pH مشاهده شد که می‌تواند به دلیل ویژگی ذاتی این پارامتر متأثر از ظرفیت بافری خاک در باغ‌های سیب استان باشد.

جدول ۲- آماره‌های توصیفی برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک باغ‌های مورد مطالعه

ویژگی خاک	واحد	میانگین	انحراف معیار	حداقل	حداکثر	چارک اول	چارک دوم	چارک سوم	ضریب تغییرات	آزمون شاپیرو-ویلک
EC	(ds/m)	۰/۵۹	۰/۲۰	۰/۱۷	۲/۵۶	۰/۴۹	۰/۵۵	۰/۶۷	۳۸	**
pH	-	۷/۹۷	۰/۴۹	۷/۳	۸/۴۰	۷/۹	۸/۰	۸/۱	۲	**
SP	(%)	۴۹/۰۱	۸/۰۶	۴/۸	۷۲/۰	۴۴/۰	۴۹/۰	۵۴/۰	۱۶	**
Sand	(%)	۲۴/۱۰	۱۱/۹۳	۱/۴۰	۶۶/۰	۱۵/۶	۲۳/۲۰	۳۰/۵۵	۵۰	**
Silt	(%)	۴۱/۴۸	۷/۵۶	۳/۶۰	۶۴/۶	۳۷/۶۰	۴۱/۰	۴۶/۰	۱۹	**
Clay	(%)	۳۴/۴۵	۹/۴۵	۱۰/۰	۵۷/۶	۲۸/۰	۳۴/۴	۴۱/۰	۲۸	ns
TNV	(%)	۱۳/۲۹	۵/۳۷	۱/۵	۴۸/۰	۱۰/۰	۱۳/۱۵	۱۵/۵	۴۳	**
OC	(%)	۰/۹۳	۰/۳۸	۰/۱۰	۲/۰۳	۰/۶۵	۰/۹۰	۱/۱۳	۴۲	**
P _{ava}	(mg/kg)	۴/۲۵	۴/۴۲	۰/۲۰	۲۲/۶۰	۱/۴۰	۲/۶	۵/۸	۹۹	**
Kava	(mg/kg)	۱۹۹/۰۶	۸۴/۵۲	۱۸/۰	۴۶۲/۰	۱۴۴	۱۹۲	۲۵۳/۰	۴۳	ns

***: کاملاً معنی‌دار در سطح آماری یک درصد؛ ns: غیر معنی‌دار

میانگین مقدار کربن آلی خاک باغ‌ها ۰/۹۳ درصد با دامنه ۱/۹۳ درصد (۰/۱ تا ۲/۵۳ درصد) بود. پراکنش نسبتاً قابل ملاحظه‌ای در بین نمونه‌ها، معادل ۴۲ درصد، از نظر مقدار کربن آلی خاک وجود داشت. در ۵۰ درصد اراضی میزان کربن آلی کمتر از ۰/۹ و در ۵۰ درصد باقیمانده بیشتر از این مقدار بود (جدول ۱). در خاک‌هایی که مقدار کربن آلی آنها نیز کمتر از ۰/۹ درصد بودند، ۲۵ درصد کمتر از ۰/۶۵ درصد کربن آلی داشتند؛ بنابراین، تنها در ۲۵ درصد این خاک‌ها میزان کربن آلی در کلاس متوسط بوده و در ۷۵ درصد، مقدار آن در کلاس کم ارزیابی شدند (جدول ۲). کمبود ماده آلی در خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه‌خشک یکی از ویژگی‌های بارز این مناطق محسوب گردیده که ویژگی‌های کیفی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد (بولان و همکاران، ۲۰۲۳).

دامنه تغییرات فسفر قابل جذب بر مبنای شاخص NIV، از ۰/۲ (کلاس کم) تا ۲۲/۶ (کلاس زیاد) میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر بود. نتایج نشان داد که ۵۰ درصد خاک باغ‌ها دارای فسفر قابل جذب کمتر از ۲/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم (کلاس کم) و ۵۰ درصد دارای مقدار بهینه تا زیاد فسفر (بیش از ۵/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بودند؛ بنابراین، بر مبنای نتایج بدست آمده برای تولید مقدار بهینه میوه سیب احتمالاً در کمتر از ۵۰ درصد باغ‌های مورد بررسی به مصرف کودهای فسفوری نیاز است. ضریب تغییرات این عنصر بیشترین مقدار را به

نتایج مربوط به ذرات تشکیل‌دهنده بافت خاک نشان می‌دهد که دامنه تغییر سه ذره رس، شن و سیلت در اراضی تحت کشت باغ‌های سیب زیاد بود. مقدار شن از ۱/۴-۶۶ درصد (میانگین ۲۴/۱ درصد)، سیلت از ۳/۶ درصد تا ۶۵ درصد و میانگین ۴۲ درصد و رس از ۱۰ تا ۵۷/۶ درصد با میانگین ۳۴/۵ درصد در این اراضی تغییر می‌کنند. میانگین بافت خاک در این اراضی با در نظر گرفتن میانگین داده‌ها برای هر سه جزء تشکیل‌دهنده بافت خاک، لوم رسی بوده و تغییرات بافت خاک بیشتر در محدوده لومی تا لوم رسی است. کربنات کلسیم معادل یکی از ویژگی‌های مهم خاک بوده و در خاک‌های آهکی بر قابلیت جذب عناصر فسفر، آهن، روی، مس و منگنز تأثیر مستقیمی می‌گذارد (وانگ و همکاران، ۲۰۲۲). دامنه تغییر این ویژگی از ۱/۵ تا ۴۸ درصد با میانگین ۱۳/۴ درصد بود. ۲۵ درصد اراضی دارای مقدار کربنات کلسیم معادل کمتر از ۱۰ درصد و تقریباً ۵۰ درصد آنها در شرایط نسبتاً آهکی تا آهکی قرار داشتند. نتایج مندرج در جدول (۱)، درصد خاک‌های خیلی آهکی را با مقادیر بیش از ۱۵/۵ درصد کمتر از ۲۵ درصد نشان داد؛ بنابراین، در چنین اراضی، اثرات منفی کربنات کلسیم اضافی بر قابلیت جذب عناصر غذایی و تعادل آنها در خاک باید در مدیریت حاصلخیزی خاک باغ‌ها مورد توجه قرار گیرند (وانگ و هائو، ۲۰۲۲؛ بولان و همکاران، ۲۰۲۳).

قرار گرفت. تعداد نمونه‌ها در کلاس کم در روش گومز ۱۴/۵ درصد و در روش دوم صفر درصد بود؛ بنابراین، چنین به نظر می‌رسد در رابطه با این ویژگی، روش گومز ارزیابی واقع‌بینانه‌تری نسبت به روش مرسوم دارد.

خود اختصاص داد. چنین استنباط می‌گردد که علت احتمالی چنین تغییرات گسترده‌ای، مصرف بی‌رویه کود فسفر بدون در نظر گرفتن نیازهای غذایی درختان سیب در منطقه و تغییرات زیاد این عنصر در یک باغ نسبت به سایر باغ‌ها باشد (جدول ۲). میانگین پتاسیم قابل جذب خاک ۱۹۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم با انحراف معیار ۸۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود که در کلاس متوسط (بهینه) قرار گرفت. دامنه تغییرات این عنصر از ۱۸ (کلاس کم) تا ۴۴۲ (کلاس زیاد) میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر بود. بر مبنای این نتایج، در بیش از ۲۵ درصد باغ‌ها، مقدار پتاسیم قابل جذب خاک در کلاس کم (۱۴۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و در بیش از ۷۵ درصد آنها در کلاس متوسط تا زیاد قرار داشت (جدول ۲).

ارزش شاخص NIV ویژگی‌های خاک در باغ‌های سیب مورد مطالعه

کلاس‌بندی برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک باغ‌های سیب مورد مطالعه به دو روش گومز و مرسوم در جدول (۳) و تعیین ارزش شاخص NIV در جدول (۴) نشان داده شده است. کلاس‌بندی و تعیین ارزش شاخص NIV با استفاده از روش گومز نشان داد که مقدار بهینه برای هدایت الکتریکی خاک در محدوده ۰/۸۲-۰/۳۷ دسی‌زیمنس بر متر و بر مبنای روش مرسوم بین ۰/۱۹-۳/۶۵ دسی‌زیمنس بر متر بودند. در هر دو روش گومز و مرسوم اغلب نمونه‌ها در کلاس مطلوب (به ترتیب ۸۷ و ۱۰۰ درصد) قرار داشتند. شاخص NIV در روش گومز با ارزش عددی ۲/۰۷ وضعیت EC را در حد بهینه و در روش مرسوم نیز با ارزش عددی ۲/۰۰ در همان کلاس ارزیابی کرد. حد مطلوب pH خاک در روش گومز در محدوده ۷/۸ تا ۸/۴ و در روش دوم بین ۷/۰ تا ۸/۱ بود. مطابق این کلاس‌بندی ۷۴ درصد نمونه‌ها در روش اول در حد بهینه و ۸۸ درصد در روش دوم در کلاس مطلوب قرار گرفتند. مطابق شاخص NIV، وضعیت خاک باغ‌های مورد بررسی از نظر pH در هر دو روش در شرایط مطلوب

جدول ۳- معیار کلاس‌بندی برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

ویژگی خاک	میانگین ($\bar{x}$)	انحراف معیار (SD)	روشن گومز			روشن مرسوم		
			کم	متوسط	زیاد	کم	متوسط	زیاد
EC (ds/m)	۰/۵۹	۰/۲۰	<۰/۳۷	۰/۳۷-۰/۸۲	۰/۸۲<	<۰/۱۹	۰/۱۹-۳/۶۵	۳/۶۵<
pH	۷/۹۷	۰/۴۹	<۷/۸	۷/۸۰-۸/۱۴	۸/۱۴<	<۷/۰۵	۷/۰۵-۸/۱۰	۸/۱۰<
SP (%)	۴۹/۰۱	۸/۰۶	<۴۱/۰۵	۴۱/۰۵-۵۷/۱۳	۵۷/۱۳<	<۴۳	۴۳-۵۳	۵۳<
Sand (%)	۳۴/۱۰	۱۱/۹۳	<۱۱/۹۱	۱۱/۹۱-۳۶/۰۷	۳۶/۰۷<	<۲۰/۰۰	۲۰/۰۰-۴۰/۰۰	۴۰/۰۰<
Silt (%)	۴۱/۴۸	۷/۵۶	<۳۳/۵۳	۳۳/۵۳-۴۹/۴۳	۴۹/۴۳<	<۲۹/۰۰	۲۹/۰۰-۵۰/۵۰	۵۰/۵۰<
Clay (%)	۳۴/۴۵	۹/۴۵	<۲۴/۸۵	۲۴/۸۵-۴۴/۰۶	۴۴/۰۶<	<۲۹/۵۰	۲۹/۵۰-۳۱/۰۰	۳۱/۰۰<
TNV (%)	۱۳/۲۹	۵/۳۷	<۷/۵۸	۷/۵۸-۱۸/۸۶	۱۸/۸۶<	<۶/۰۵	۶/۰۵-۳۳/۰۰	۳۳/۰۰<
OC (%)	۰/۹۳	۰/۳۸	<۰/۵۳	۰/۵۳-۱/۳۱	۱/۳۱<	<۰/۳۷	۰/۳۷-۱/۴۴	۱/۴۴<
P _{ava} (mg/kg)	۴/۲۵	۴/۴۲	<۰/۰۵	۰/۰۵-۸/۴۲	۸/۴۲<	<۶/۰۰	۶/۰۰-۱۱/۵۵	۱۱/۵۵<
K _{ava} (mg/kg)	۱۹۹/۰۶	۸۴/۵۲	<۱۱۲/۹۵	۱۱۲/۹۵-۲۸۵/۱۶	۲۸۵/۱۶<	<۱۴۷/۵	۱۴۷/۵-۲۹۱/۷	۲۹۱/۷<

جدول ۴- کلاس‌بندی، درصد نمونه و ارزش شاخص عناصر غذایی برای ویژگی‌های خاک باغ‌های سیب با دو روش گومز و مرسوم

ویژگی	کلاس‌بندی گومز						کلاس‌بندی مرسوم						NIV	طبقه		
	کلاس آزمون خاک			درصد نمونه‌ها			کلاس آزمون خاک			درصد نمونه‌ها						
	کم	متوسط	زیاد	کم	متوسط	زیاد	کم	متوسط	زیاد	کم	متوسط	زیاد				
EC (ds/m)	<۰/۳۷	۰/۳۷-۰/۸۲	<۰/۸۲	۰/۳۷	۸۶/۸	۶/۹	۲/۰۷	بهبینه	<۰/۱۹	۰/۱۹-۳/۶۵	<۳/۶۵	۰	۱۰۰	۰	۲/۰۰	بهبینه
pH	<۷/۸	۷/۸۰-۸/۱۴	<۸/۱۴	۱۴/۵	۷۳/۷	۱۱/۸	۱/۹۷	بهبینه	<۷/۰۵	۷/۰۵-۸/۱۰	<۸/۱۰	۰	۸۷/۵	۱۲/۵	۲/۱۳	بهبینه
SP (%)	<۴۱/۰۵	۴۱/۰۵-۵۷/۱۳	<۵۷/۱۳	۱۳/۹	۷۲/۶	۱۳/۵	۲/۰۰	بهبینه	<۴۳	۴۳-۵۳	<۵۳	۲۱/۳	۵۰/۷	۲۸	۲/۰۷	بهبینه
Sand (%)	<۱۱/۹۱	۱۱/۹۱-۳۶/۰۷	<۳۶/۰۷	۱۸/۹	۶۸/۱	۱۹/۸	۲/۰۱	بهبینه	<۲۰/۰۰	۲۰/۰۰-۴۰/۰۰	<۴۰/۰۰	۳۸/۲	۶۱/۸	۰	۱/۶۲	کمبود
Silt (%)	<۳۳/۵۳	۳۳/۵۳-۴۹/۴۳	<۴۹/۴۳	۱۰/۲	۷۶/۶	۱۳/۲	۲/۰۳	بهبینه	<۲۹/۰۰	۲۹/۰۰-۵۰/۵۰	<۵۰/۵۰	۵/۱	۸۸/۱	۱۱/۹	۲/۰۶	بهبینه
Clay (%)	<۲۴/۸۵	۲۴/۸۵-۴۴/۰۶	<۴۴/۰۶	۱۵/۳	۸۴/۷	۰	۱/۸۵	بهبینه	<۲۹/۵۰	۲۹/۵۰-۳۱/۰۰	<۳۱/۰۰	۳۴/۹	۴/۱	۶۱/۰	۲/۲۶	بهبینه
TNV (%)	<۷/۵۸	۷/۵۸-۱۸/۸۶	<۱۸/۸۶	۱۰/۵	۷۵/۶	۱۳/۹	۲/۰۳	بهبینه	<۶/۰۵	۶/۰۵-۳۳/۰۰	<۳۳/۰۰	۷/۴	۹۱/۹	۰/۷	۱/۹۳	بهبینه
OC (%)	<۰/۵۳	۰/۵۳-۱/۳۱	<۱/۳۱	۱۵/۲	۶۸/۶	۱۶/۲	۲/۰۱	بهبینه	<۰/۳۷	۰/۳۷-۱/۴۴	<۱/۴۴	۵/۷	۸۴/۵	۹/۸	۲/۰۴	بهبینه
Pava (mg/kg)	<۰/۰۵	۰/۰۵-۸/۴۲	<۸/۴۲	۴/۱	۷۹/۷	۱۵/۲	۲/۱۱	بهبینه	<۶/۰۰	۶/۰۰-۱۱/۵۵	<۱۱/۵۵	۷۸/۰	۱۳/۹	۸/۱	۱/۳۰	کمبود
Kava (mg/kg)	<۱۱۲/۹۵	۱۱۲/۹۵-۲۸۵/۱۶	<۲۸۵/۱۶	۱۶/۶	۶۵/۸	۱۷/۶	۲/۰۱	بهبینه	<۱۴۷/۵	۱۴۷/۵-۲۹۱/۷	<۲۹۱/۷	۲۹۱/۴	۵۶/۷	۱۶/۹	۱/۹۰	بهبینه

وضعیت ذرات تشکیل‌دهنده خاک در مناطق تحت بررسی، مقدار شاخص NIV برای درصد شن روش اول معادل ۲/۰۱ و در روش دوم برابر ۱/۶۲ بود. بر این مبنا، روش اول وضعیت درصد شن خاک را در خاک باغ‌های سیب موردبررسی بهینه (۶۸/۱ درصد) ولی در روش دوم کم (۳۸/۲ درصد اراضی) ارزیابی نمود. در هر دو روش وضعیت عمومی درصد سیلت و رس در حد مطلوب ارزیابی شدند. همچنین درصد رطوبت وزنی خاک بر مبنای هر دو روش در کلاس مطلوب با مقادیر شاخص NIV معادل ۲/۰۰ و ۲/۰۷ و درصد فراوانی نمونه‌ها در روش‌های گومز و مرسوم برای کلاس فوق به ترتیب معادل ۷۲/۶ و ۵۰/۷ درصد کل نمونه‌های خاک را شامل شد (جدول ۴).

ارتباط بین ویژگی‌های خاک در باغ‌های سیب

نتایج نشان داد که با افزایش مقدار کربن آلی خاک، هدایت الکتریکی عصاره اشباع نیز افزایش می‌یابد (جدول ۵). این پدیده به‌چند دلیل اتفاق می‌افتد. مواد آلی دارای بار منفی زیادی هستند و با افزایش آنها، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک نیز افزایش می‌یابد. این به معنی نگهداری بیشتر یون‌ها در خاک است که می‌توانند در عصاره اشباع آزاد شوند و باعث افزایش این ویژگی خاک شوند (بردی و ویل، ۲۰۱۶). از طرفی، تجزیه مواد آلی می‌تواند به تولید ترکیبات محلول مانند اسیدهای آلی، یون‌های کلسیم، پتاسیم، نیترات و سایر اکسی آنیون‌ها منجر شود که مستقیماً باعث افزایش غلظت الکترولیت‌ها در محلول خاک می‌شود (اسپارکس، ۲۰۰۳).

حد مطلوب کربنات کلسیم معادل در روش گومز در محدوده ۱۸/۸-۷/۶ درصد و در روش مرسوم ۳۳/۰۰-۶/۰۵ درصد قرار گرفتند. شاخص NIV نشان داد که در روش گومز و مرسوم به ترتیب با ۷۶ و ۹۲ درصد نمونه‌های خاک در وضعیت مطلوب بودند. در کلاس زیاد در روش گومز ۱۳/۵ درصد ولی در روش مرسوم تنها ۰/۷ درصد نمونه‌ها قرار گرفتند؛ بنابراین، در مورد این ویژگی نیز چنین استنباط می‌گردد که روش گومز تحلیل واقع‌بینانه‌تری نسبت به روش مرسوم ارائه می‌نماید. مقادیر کلاس‌ها برای درصد کربن آلی خاک‌های موردبررسی مانند بیشتر پارامترها در روش اول و در روش دوم در حد بهینه‌ای قرار گرفتند. نتیجه حاصل از شاخص NIV پیش‌بینی‌های نسبتاً مشابهی را برای هر دو روش ارائه داد. بطوریکه در روش اول ۶۸/۶ درصد و در روش دوم ۸۴/۵ درصد در شرایط بهینه ارزیابی نمودند. در رابطه با ویژگی فسفر قابل جذب خاک، روش گومز با شاخص NIV برابر ۲/۱۱ در ۷۹/۷ درصد نمونه‌های خاک، وضعیت فسفر قابل جذب خاک را مطلوب ارزیابی کرد. در روش مرسوم مقدار این شاخص ۱/۳۰ و در ۷۸/۰ درصد نمونه‌های خاک، کمبود فسفر وجود داشت. در پاسخ به این سؤال که کدام روش ارزیابی بهتری در رابطه با وضعیت فسفر قابل جذب خاک در باغ‌های مورد مطالعه ارائه می‌نماید، بر اساس داده‌های موجود، امکان ارائه پاسخ امکان‌پذیر نیست زیرا امکان برآورد غلظت بحرانی عناصر در خاک باغ عملاً ممکن نیست (جتیل و همکاران، ۲۰۲۲). در این رابطه نیاز به نتایج تجزیه برگ باغ‌ها و مقایسه نتایج بدست آمده با دو روش ارزیابی شاخص NIV است. میزان پتاسیم قابل جذب خاک در روش‌های گومز و مرسوم در کلاس کفایت (بهینه) به ترتیب در محدوده‌های ۱۱۲/۹۵-۲۸۵/۱۶ و ۱۴۷/۵-۲۹۱/۷ بوده و ۶۵/۸ و ۵۶/۷ درصد نمونه‌ها نیز در این کلاس قرار گرفتند. هر دو روش شاخص NIV را در شرایط بهینه ارزیابی نموده که بیانگر حاصلخیز بودن اغلب باغ‌های تحت بررسی از نظر غلظت پتاسیم قابل جذب خاک است. در ارزیابی

جدول ۵- همبستگی پیرسون بین برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک باغ‌های سیب

ویژگی خاک	EC (ds/m)	pH	SP (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	TNV (%)	OC (%)	Pava (mg/kg)	Kava (mg/kg)
EC (ds/m)	۱									
pH	-۰/۰۴۲	۱								
SP (%)	-۰/۰۳۹	-۰/۱۱۹*	۱							
Sand (%)	-۰/۱۱۳*	۰/۱۰۸	۰/۶۲۷**	۱						
Silt (%)	-۰/۰۲۵	۰/۰۷۰	۰/۲۴۵**	-۰/۵۵۹**	۱					
Clay (%)	-۰/۱۴۴*	-۰/۱۹۸**	۰/۵۸۶**	۰/۷۹۰**	-۰/۰۳۹	۱				
TNV (%)	۰/۰۹۹	۰/۱۱۱	-۰/۰۰۹	۰/۰۸۱	۰/۰۷۷	-۰/۱۸۱**	۱			
OC (%)	۰/۲۸۰**	-۰/۲۵۶**	۰/۳۶۶**	-۰/۲۶۳**	۰/۱۳۳*	۰/۲۱۴**	-۰/۰۱۵	۱		
Pava (mg/kg)	۱۵۴**	-۰/۰۹۶	۰/۰۵۳	-۰/۰۱۴	-۰/۰۵۲	۰/۰۱۵	۰/۰۷۵	۰/۳۵۳**	۱	
Kava (mg/kg)	-۰/۰۹۹	-۰/۱۸۷**	۰/۲۵۲**	-۰/۳۹۶**	۰/۰۶۷	۰/۱۲۷*	۰/۳۹۱**	-۰/۳۷۸**	۱	۱

می‌توان به تجزیه مواد آلی توسط میکرو ارگانیسم‌ها و تولید اسیدهای آلی، هیدرولیز نمک‌های محلول مثل سولفات‌ها، تجمع موضعی دی اکسید کربن حاصل از تنفس ریشه‌ها و میکروب‌ها و فرایندهای اکسایش در نقاطی که شرایط اکسیداسیون و احیا به صورت متناوب تغییر می‌کند، اشاره نمود (هینسینگر، ۲۰۰۱).

نتایج رابطه معکوسی بین pH خاک و میزان رس خاک در سطح آماری یک درصد نشان داد (جدول ۵). مطابق بررسی‌های پیشین، وقتی pH خاک افزایش می‌یابد (خصوصاً در خاک‌های آهکی)، چند تغییر مهم در ساختار و رفتار ذرات رس رخ می‌دهد که منجر به کاهش محسوس رس خاک می‌شود. در خاک آهکی، افزایش pH باعث کاهش حلالیت کلسیم کربنات و تشکیل رسوب در اطراف ذرات رس می‌شود. این رسوبات، ذرات رس را به هم می‌چسبانند و ضریب تفکیک آن‌ها را کاهش می‌دهند. به عبارت دیگر، آهک هیدراته در تماس با دی اکسید کربن هوا به کربنات کلسیم تبدیل می‌شود. این رسوبات بر روی ذرات رس نقش چسباننده دارند و در نتیجه ساختار بزرگ‌تری را ایجاد کرده و توزیع ذرات رس را به طور قابل توجهی تغییر می‌دهند. این عامل به همراه همگرایی ذرات خاک باعث کاهش میزان رس آزاد شده در محلول یا آزمایش‌ها اندازه‌گیری می‌شود (رازقی و همکاران، ۲۰۲۴).

با افزایش کربن آلی خاک، فعالیت میکروبی نیز افزایش می‌یابد که به معدنی شدن نیتروژن (تولید نترات)، گوگرد (تولید سولفات) و سایر عناصر منجر می‌شود. این ترکیبات معدنی محلول، به افزایش هدایت الکتریکی کمک می‌کنند (استیونسون، ۱۹۹۴).

رابطه بسیار قوی و مثبتی بین ویژگی‌های هدایت الکتریکی و میزان فسفر قابل جذب خاک وجود داشت. بررسی‌ها نشان داده است که افزایش هدایت الکتریکی عصاره اشباع در خاک‌های آهکی، باعث افزایش غلظت فسفر قابل جذب خاک می‌شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۲). در خاک‌های آهکی، فسفر عمدتاً با کلسیم واکنش داده و رسوبات غیر محلول مانند کلسیم فسفات تشکیل می‌دهد. زمانی که EC_e افزایش می‌یابد یعنی غلظت یون‌های محلول مانند Na^+ ، K^+ ، Mg^{2+} ، Cl^- و SO_4^{2-} و غیره بالا می‌رود، این یون‌ها با یون‌های کلسیم رقابت می‌کنند و فعالیت شیمیایی یون Ca^{2+} کاهش می‌یابد. این موضوع باعث کاهش رسوب فسفر و افزایش غلظت فسفر محلول و قابل جذب در خاک می‌شود. افزایش EC باعث افزایش قدرت یونی محلول خاک شده که به نوبه خود ضریب فعالیت فسفات‌ها را بالا می‌برد و می‌تواند انحلال برخی ترکیبات فسفر نامحلول مانند $Ca_5(PO_4)_3OH$ را افزایش دهد. از طرفی در نواحی با EC بالا، گاهی pH به صورت موضعی کاهش می‌یابد که خود می‌تواند حلالیت فسفر را بالا ببرد. از دلایل کاهش موضعی pH،

که پتاسیم می‌تواند بین لایه‌های آنها به‌صورت یونی تثبیت شود (اسپارکس، ۲۰۰۳). همچنین، در خاک‌های آهکی حضور کربنات کلسیم باعث افزایش pH و شرایط قلیایی می‌شود که بر پایداری ترکیبات پتاسیم تأثیر می‌گذارد و باعث می‌شود پتاسیم بیشتر جذب ذرات خاک شده و به‌صورت غیر قابل جذب باقی بماند (شارما و شوکلا، ۱۹۹۷). مطالعه‌ای در خاک‌های آهکی ایران نشان داد که افزایش کربن آلی منجر به کاهش پتاسیم محلول شده است و دلیل اصلی آن افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و تثبیت پتاسیم در ساختار کانی‌های خاک توضیح داده شد (محمدی و همکاران، ۱۳۹۵).

درصد اشباع خاک با درصد شن همبستگی منفی معنی‌دار ولی با سایر ذرات تشکیل‌دهنده بافت خاک یعنی درصد سیلت و رس همبستگی مثبت داشت (جدول ۵). ذرات شن باعث افزایش اندازه منفذها می‌شود؛ بنابراین، آب زودتر از این خاک‌ها خارج‌شده و ظرفیت نگهداری آب کاهش می‌یابد. ذرات سیلت و رس منافذ کوچک‌تر دارند و آب را بهتر نگه می‌دارند (آسوویس و لیپیک، ۲۰۲۱). همبستگی مثبت و معنی‌داری بین ویژگی‌های کربن آلی و درصد اشباع خاک مشاهده شد (جدول ۵). افزایش کربن آلی خاک (SOC)^۳ به‌طور معمول با افزایش درصد اشباع آب در خاک همراه است. همچنین، SOC چگالی ظاهری خاک را کاهش می‌دهد که نتیجه آن افزایش تخلخل و فضای ذخیره‌سازی آب است. رامیرز و همکاران (۲۰۲۳) دریافتند که افزایش SOC مستقیماً با افزایش ظرفیت نگهداری آب ارتباط دارد و سطح اشباع آب خاک را افزایش می‌یابد؛ بنابراین، در اقلیم‌های خشک، کربن آلی خاک یکی از قوی‌ترین عوامل تعیین‌کننده ظرفیت نگهداری آب در خاک است.

با افزایش درصد شن خاک میزان کربن آلی خاک به‌طور معنی‌دار کاهش یافت، با این وجود همبستگی مثبت و معنی‌داری بین ویژگی‌های سیلت و کربن آلی خاک وجود داشت (جدول ۵). تحقیقات نشان داده است که افزایش درصد

بررسی همبستگی آماری داده‌ها نشان داد که بین ویژگی‌های مقدار کربن آلی خاک و pH خاک در سطح آماری یک درصد رابطه معکوسی وجود داشت (جدول ۵). بررسی‌ها نشان داده است که افزایش کربن آلی خاک معمولاً منجر به کاهش pH خاک می‌شود. کربن آلی خاک عمدتاً از بقایای گیاهی، کودهای آلی و مواد هیومیکی تشکیل شده است. زمانی که این مواد آلی به خاک افزوده می‌شوند، تحت تأثیر میکروارگانیسم‌ها تجزیه می‌شوند. در طول این فرآیند، اسیدهای آلی (مانند اسید استیک، اسیدلاکتیک و اسیدهای فولیک و هیومیک) تولید می‌گردند که خاصیت اسیدی دارند و منجر به کاهش pH خاک می‌شوند. این اسیدها یون‌های هیدروژن (H^+) آزاد می‌کنند که مستقیماً موجب اسیدی شدن محیط می‌شوند. فعالیت میکروبی ناشی از حضور مواد آلی باعث تولید CO_2 می‌شود. این CO_2 در رطوبت خاک حل شده و به‌صورت H_2CO_3 (اسیدکربنیک) درمی‌آید که خاصیت اسیدی دارد. اسیدهای آلی می‌توانند کاتیون‌هایی مثل Ca^{2+} ، Mg^{2+} ، K^+ را کلاته کنند و از محل‌های تبادل کاتیونی خارج نمایند که باعث افزایش غلظت یون H^+ در محلول خاک و در نتیجه کاهش pH می‌شود (بردی و ویل، ۲۰۱۶).

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها نشان داد که بین pH و میزان پتاسیم قابل جذب خاک رابطه معکوسی وجود داشت (جدول ۵). بدین مفهوم که با افزایش pH خاک، میزان قابلیت جذب پتاسیم قابل جذب به‌طور کاملاً معنی‌داری کاهش یافت ($P \leq 0.01$). افزایش کربن آلی در خاک‌های آهکی معمولاً با چندین مکانیسم مختلف منجر به کاهش پتاسیم قابل جذب می‌شود. مواد آلی خاک دارای گروه‌های عاملی با بار منفی هستند که ظرفیت تبادل کاتیونی خاک را افزایش می‌دهند (اسپارکس، ۲۰۰۳). این افزایش باعث جذب بیشتر یون‌های پتاسیم در سطح ذرات خاک می‌شود و پتاسیم را از فاز محلول (قابل جذب گیاه) جدا می‌کند. خاک‌های آهکی اغلب شامل کانی‌های رسی گروه ۲:۱ (مثل ایلیت و ورمی‌کولیت) هستند

³ Soil Organic Matter (SOC)

شن خاک معمولاً باعث کاهش میزان کربن آلی می‌شود. ذرات شن درشت بوده که سطح کمی در واحد جرم ایجاد می‌کنند. نتیجه این که ظرفیت جذب و تثبیت مواد آلی به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. برعکس، ذرات ریز (سیلت و رس) حجم بالایی از سطح ویژه دارند که به‌ویژه محل جذب ترکیبات آلی بر روی سطح ذرات کانی‌های خاک فراهم می‌کنند (خوساروف و همکاران، ۲۰۲۴؛ بروفکا، ۲۰۲۴). خاک با درصد شن بالا، اغلب فاقد ساختار دانه‌ای بوده و تخلخل بزرگ دارد. در مقابل، خاک‌های با درصد رس و سیلت بیشتر ساختار بهتری شکل می‌دهند که آب و مواد آلی را در خود نگه می‌دارد (کوسادا و همکاران، ۲۰۲۰). آرونزات و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که درصد شن بالا در خاک‌های شنی شمال شرق تایلند، عمدتاً با کمبود SOC همراه بود. همچنین بین درصد شن خاک و قابلیت استفاده پتاسیم در خاک نیز رابطه کاملاً معنی‌داری وجود داشت به‌طوری‌که با افزایش مقدار شن خاک میزان پتاسیم قابل جذب خاک کاهش یافت. همبستگی مثبت و قوی بین درصد کربنات کلسیم معادل و درصد رس وجود داشت بطوریکه با افزایش درصد کربنات کلسیم معادل، درصد رس خاک نیز افزایش معنی‌داری نشان داد (جدول ۵). رابطه بین میزان رس خاک و میزان کربنات کلسیم معادل در خاک‌ها، به‌ویژه خاک‌های آهکی، از اهمیت بالایی برخوردار است و تحت تأثیر فرآیندهای مختلف زمین‌شناسی و شیمیایی قرار دارد. مطالعات نشان داده‌اند که در خاک‌های آهکی، افزایش مقدار ذرات رس معمولاً با افزایش مقدار کربنات کلسیم معادل همراه است. در بسیاری از خاک‌ها، رس‌ها و کربنات‌ها هر دو از سنگ‌های مادر آهکی و رسوبی منشأ گرفته‌اند و بنابراین در کنار هم وجود دارند (بوهن و همکاران، ۲۰۰۱). در خاک‌های آهکی ایران که اغلب در مناطق خشک و نیمه‌خشک پراکنده‌اند، میزان رس خاک و کربنات کلسیم معادل ارتباط مستقیم و متقابلی باهم دارند. ذرات ریز رس با سطح ویژه زیاد، مکان مناسبی برای جذب یون‌های کلسیم و کربنات‌ها را فراهم می‌

کنند که به‌تدریج منجر به رسوب کربنات کلسیم در خاک می‌شود (مظفری، ۱۳۹۳). از سوی دیگر، مقدار کربنات کلسیم معادل خاک‌ها معمولاً در خاک‌هایی با محتوای رس بالاتر بیشتر است؛ زیرا این خاک‌ها دارای شرایط شیمیایی و فیزیکی مساعدتری برای تثبیت کربنات‌ها هستند. همچنین، وجود رس باعث افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک شده و محیطی با تعادل یونی مناسب برای شکل‌گیری کربنات کلسیم فراهم می‌نماید (سعیدی و همکاران، ۱۳۹۷). این روند در خاک‌های آهکی ایران که بیشتر بر پایه سنگ‌های آهکی و دولومیتی تشکیل شده‌اند، مشهود است. همچنین عوامل اقلیمی و زیستی مانند تبخیر بالا و فعالیت‌های میکروبی نیز در فرآیند تشکیل کربنات کلسیم مؤثرند (نقیبی، ۱۳۹۵).

همبستگی مثبت و بسیار قوی بین مقدار کربن آلی خاک و فسفر قابل جذب خاک وجود داشت و با افزایش کربن آلی خاک، میزان فسفر قابل جذب خاک به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (جدول ۵). بررسی‌ها نشان داده است که افزایش کربن آلی خاک می‌تواند موجب افزایش قابلیت جذب فسفر در خاک‌های آهکی شود. این اثر به‌ویژه در خاک‌هایی که دارای کربنات کلسیم هستند، مشهودتر است. کربن آلی با تأثیر بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، می‌تواند دسترسی فسفر را بهبود بخشد. تجزیه کربن آلی با آزادسازی اسیدهای آلی مانند اسید هیومیک و فولیک، pH خاک را کاهش می‌دهد. این کاهش pH موجب کاهش تشکیل فازهای نامحلول فسفر مانند دی کلسیم فسفات می‌شود و در نتیجه فسفر بیشتری در دسترس گیاه قرار می‌گیرد (ون و اندراسزکا، ۲۰۰۶). اسیدهای آلی موجود در مواد آلی می‌توانند با فسفات‌ها برای اتصال به سایت‌های جذب در سطح ذرات خاک رقابت کنند. این رقابت منجر به کاهش جذب فسفر توسط ذرات خاک و افزایش دسترسی آن برای گیاه می‌شود. مواد آلی همچنین می‌توانند با یون‌های فلزی مانند آهن و آلومینیوم ترکیب شده و کمپلکس‌های آلی-معدنی تشکیل دهند. این کمپلکس‌ها می‌توانند فسفر را از فازهای

نامحلول آزاد کرده و در دسترس گیاه قرار دهند (وانگ و همکاران، ۲۰۲۱).

مواد آلی به عنوان منبع انرژی برای میکروارگانیسم‌ها عمل می‌کنند. افزایش فعالیت میکروبی می‌تواند منجر به تجزیه مواد آلی و آزادسازی فسفر از فازهای نامحلول شود (احمد و خان، ۲۰۱۱). چنین روندی نیز بین کربن آلی خاک و میزان پتاسیم قابل جذب خاک وجود داشت. غلظت پتاسیم قابل جذب با افزایش کربن آلی خاک به طور کاملاً معنی‌داری افزایش یافت (جدول ۵). در خاک‌های آهکی، یون‌های کلسیم می‌توانند با پتاسیم رقابت کنند و موجب تثبیت آن شوند. افزایش کربن آلی می‌تواند با کاهش pH و افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، رقابت بین کلسیم و پتاسیم را کاهش داده و در نتیجه دسترسی گیاهان به پتاسیم افزایش یابد. مواد آلی به عنوان منبع انرژی برای میکروارگانیسم‌ها عمل می‌کنند. این میکروارگانیسم‌ها می‌توانند ترکیبات پتاسیم‌دار را تجزیه کرده و پتاسیم را به شکل قابل جذب برای گیاه آزاد کنند. ترکیبات آلی می‌توانند با ذرات خاک تعامل کرده و ساختار خاک را بهبود بخشند. این بهبود ساختار می‌تواند منجر به افزایش ظرفیت نگهداری آب و عناصر غذایی، از جمله پتاسیم، در خاک شود (کوسادا و همکاران، ۲۰۲۰؛ ستوارد و همکاران، ۲۰۰۷).

همبستگی مثبت و معنی‌داری نیز بین فسفر و پتاسیم قابل جذب وجود داشت، بطوریکه، با افزایش غلظت یکی، غلظت دیگری نیز به طور معنی‌دار افزایش یافت (جدول ۵). همبستگی مثبت بین فسفر و پتاسیم قابل جذب در خاک‌های آهکی نتیجه تعامل پیچیده بین منابع تغذیه‌ای (کودها)، ویژگی‌های شیمیایی خاک (CaCO_3 ، CEC)، رفتار تثبیت و آزادسازی تدریجی فسفر و نقش مواد آلی است. کاربرد دائمی کودهای فسفاته و پتاسیمی و حتی کودهای دامی و آلی باعث افزایش هم‌زمان سطح حاصلخیزی خاک از این دو عنصر می‌شود. مطالعه‌ای در منطقه مدیترانه نشان داد که اراضی کشاورزی دارای مقادیر بالای فسفر و پتاسیم قابل جذب

هستند. در این مناطق، کودهای فسفره معمولاً همراه با کود پتاسیمی استفاده شده که منجر به افزایش هم‌زمان قابلیت جذب هر دو عنصر در خاک می‌شود (اورتز و همکاران، ۲۰۲۳). از طرفی، خاک‌های آهکی دارای یون‌های کلسیم زیاد هستند که باعث تأثیر بر جذب کاتیون‌های دیگر مانند پتاسیم می‌شود. وقتی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک بالاست، هم فسفر و هم پتاسیم بهتر در دسترس گیاه قرار می‌گیرند. فسفر تثبیت‌شده با کربنات کلسیم به شکل فازهای دارای انحلال آهسته باقی می‌ماند و با گذشت زمان به تدریج تبدیل به فسفر قابل جذب می‌شود (لیتم و میکلسن، ۲۰۰۵). وقتی فسفر افزوده می‌شود و تثبیت می‌شود، بخشی از آن در طی زمان آزاد می‌گردد؛ در همین زمان کودهای پتاسیم نیز هم‌زمان اضافه شده و بنابراین، در نمونه‌های خاک همبستگی مشاهده می‌شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۴). همچنین بررسی‌ها نشان داده است افزودن کود دامی یا مواد آلی، علاوه بر تأمین P و K، با آزادسازی اسیدهای آلی، توان بازیافت فسفر را افزایش می‌دهد (مور و همکاران، ۲۰۱۴).

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک باغ‌های سیب استان آذربایجان غربی بر اساس شاخص ارزش غذایی انجام گرفت. یافته‌های این پژوهش نشان داد که خاک باغ‌های سیب در استان آذربایجان غربی، با وجود تنوع در برخی ویژگی‌های شیمیایی و حاصلخیزی، به طور کلی از وضعیت نسبتاً مطلوبی برای رشد و تولید سیب برخوردارند. مقادیر بالای pH و کربنات کلسیم معادل، بیانگر غلبه شرایط قلیایی در منطقه است که می‌تواند بر دسترسی عناصر غذایی به‌ویژه فسفر تأثیرگذار باشد. با این حال، توزیع فسفر قابل جذب نشان داد که نیمی از خاک‌ها در محدوده بهینه تا بالا قرار دارند و وضعیت پتاسیم نیز عمدتاً در کلاس متوسط تا مطلوب ارزیابی شد. درصد کربن آلی در اکثر نمونه‌ها پایین تا متوسط بود که اهمیت توجه به مدیریت

مواد آلی خاک را برجسته می‌کند. در نهایت، یافته‌ها نشان داد که خاک باغ‌های سیب استان آذربایجان غربی علی‌رغم داشتن برخی محدودیت‌ها، در مجموع از پتانسیل بالایی برای تولید برخوردارند. فرضیه تحقیق مبنی بر مناسب بودن ویژگی‌های خاک در شرایط مدیریت صحیح، مورد تأیید قرار گرفت.

مهم‌ترین چالش‌ها شامل قلیائیت بالا و کمبود ماده آلی هستند که با مدیریت‌های اصلاحی قابل رفع می‌باشند؛ بنابراین، با اعمال مدیریت علمی و بهره‌گیری از شاخص‌های ارزیابی مانند شاخص ارزش غذایی می‌توان تصمیمات مدیریتی مبتنی بر داده اتخاذ کرده و عملکرد و کیفیت محصول را بهینه نمود.

فهرست منابع

۱. سعیدی، م، رضایی، ع، کاظمی، م. ۱۳۹۷. بررسی رابطه بین بافت خاک و کربنات کلسیم معادل در خاک‌های آهکی منطقه خوزستان. *مجله علوم خاک ایران*، ۱۱(۴)، ۵۹-۷۰.
<https://doi.org/20.1001.1.2008479.1389.41.2.7.8>.
۲. شهبازی، ک. ۱۴۰۳. روش‌های تجزیه خاک نمونه‌برداری، روش‌های شیمیایی و فیزیکی. چاپ اول، انتشارات موسسه تحقیقات خاک و آب، کرج، ایران. ۱۰۷۴ صفحه.
۳. قائمیان، ن، حسنی، ق، طهماسبی، ک، نعمتی، ط، مسیح آبادی، م. ح. ۱۳۸۸. درجه‌بندی ویژگی‌های اراضی و نیازهای زویشی سیب جهت تهیه جداول پایه تناسب اراضی در استان آذربایجان غربی. گزارش نهائی، شماره ۷۷۰/۸۹، موسسه تحقیقات خاک و آب، تهران، ایران. ۴۷ صفحه.
۴. محمدی، م، رضایی، ن. و حسینی، ر. ۱۳۹۵. تأثیر مواد آلی بر تثبیت پتاسیم در خاک‌های آهکی ایران. *مجله علوم خاک ایران*، دوره ۲۳، ۴، ۵۲۱-۵۳۰.
۵. مظفری، ع. ۱۳۹۳. شناخت و اصلاح خاک‌های آهکی. انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۶. نقیعی، ح. ۱۳۹۵. تأثیر شرایط اقلیمی بر تشکیل کربنات کلسیم در خاک‌های مناطق خشک ایران. پژوهش‌های خاک و آب ایران، ۲۰(۳)، ۳۳-۴۵.
8. Adak, T. and Pandey, G., 2020. Estimating soil nutrient index vis-à-vis mango orchard productivity of Lucknow region, Uttar Pradesh, India. *Tropical Plant Research*, 7(3), pp.622-626. DOI: [10.22271/tpr.2020.v7.i3.077](https://doi.org/10.22271/tpr.2020.v7.i3.077)
9. Adak, T., Pandey, G., Singh, V.K. and Rajan, S., 2019. Assessing soil nutrient index in mango orchards of Maal area, Lucknow, UP. *Journal of Soil and Water Conservation*, 18(3), pp.263-267. DOI: [10.5958/2455-7145.2019.00037.7](https://doi.org/10.5958/2455-7145.2019.00037.7)
10. Ahemad, M., and Khan, M. S., 2011. Assessment of plant growth promoting activities of phosphate solubilizing bacteria in calcareous soils. *Environmental Monitoring and Assessment*, 174(1), 533-546. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1471-3>
11. Arunrat, N., Kongsurakan, P., Sereenonchai, S. and Hatano, R., 2020. Soil organic carbon in sandy paddy fields of Northeast Thailand: A review. *Agronomy*, 10(8), p.1061. DOI: [10.3390/agronomy10081061](https://doi.org/10.3390/agronomy10081061)
12. Brady, N.C., 1984. The nature and properties of soils. 15th Edition. Pearson Education.
13. Bohn, H.L., McNeal, B.L. and O'Connor, G.A., 2001. Soil Chemistry 3rd Edition. Canada: John & Wiley Sons. Inc. <http://dx.doi.org/10.1002/jpln.19861490315>.
14. Stevenson, F.J., 1994. Humus chemistry: genesis, composition, reactions. John Wiley & Sons.

15. Bertrand, I.H.R.A., Holloway, R.E., Armstrong, R.D. and McLaughlin, M.J., 2003. Chemical characteristics of phosphorus in alkaline soils from southern Australia. *Soil Research*, 41(1), pp.61-76. [https://doi.org/10.1071/SR02021\(publish.csiro.au\)](https://doi.org/10.1071/SR02021(publish.csiro.au))
16. Bolan, N., Srivastava, P., Rao, C.S., Satyanaraya, P.V., Anderson, G.C., Bolan, S., Nortjé, G.P., Kronenberg, R., Bardhan, S., Abbott, L.K. and Zhao, H., 2023. Distribution, characteristics and management of calcareous soils. *Advances in agronomy*, 182, pp.81-130. DOI: [10.1016/bs.agron.2023.06.002](https://doi.org/10.1016/bs.agron.2023.06.002)
17. Durkhshan, S., 2022. Nutrient Indexing of High Density Apple Orchards of SKUAST-K, Shalimar (Doctoral dissertation, SKUAST Kashmir).
18. Gentile, R.M., Boldingh, H.L., Campbell, R.E., Gee, M., Gould, N., Lo, P., McNally, S., Park, K.C., Richardson, A.C., Stringer, L.D. and Vereijssen, J., 2022. System nutrient dynamics in orchards: a research roadmap for nutrient management in apple and kiwifruit. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(4), p.64. DOI:[10.1007/s13593-022-00798-0](https://doi.org/10.1007/s13593-022-00798-0)
19. Gomez, K.A. and Gomez, A.A., 1984. *Statistical procedures for agricultural research*. John Wiley & sons.
20. Hinsinger, P., 2001. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant and soil*, 237(2), pp.173-195. DOI:[10.1023/A:1013351617532](https://doi.org/10.1023/A:1013351617532)
21. Khosravi, V., Gholizadeh, A., Žižala, D., Kodešová, R., Saberioon, M., Agyeman, P.C., Vokurková, P., Juřicová, A., Spasić, M. and Borůvka, L., 2024. On the impact of soil texture on local scale organic carbon quantification: From airborne to spaceborne sensing domains. *Soil and Tillage Research*, 241, p.106125. DOI:[10.1016/j.still.2024.106125](https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106125)
22. Leytem, A.B. and Mikkelsen, R.L., 2005. The nature of phosphorus in calcareous soils. *Better Crops*, 89(2), pp.11-13.
23. Marschner, H., 2012. Marschner's mineral nutrition of higher plants. Academic press.
24. Küçükdonmez, B., Şeker, C. and Neğiş, H., 2025. Influence of Soil Quality on Apple Yield: Evaluating Physical, Chemical, and Biological Indicators in Semi-dwarf Orchards. *Applied Fruit Science*, 67(3), pp.1-14. DOI:[10.1007/s10341-025-01410-x](https://doi.org/10.1007/s10341-025-01410-x)
25. Masrat, M., 2019. Characterization, Classification and Nutrient Indexing of High Density Apple Orchard Soils of North Kashmir (Doctoral dissertation, SKUAST Kashmir).
26. Men, X., Fan, Z., Wang, Y., Wang, Y., Wang, Y. and Han, Z., 2023, March. Evaluation of fertilizer inputs and soil nutrient status in apple orchards in China. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2463, No. 1, p. 012069). IOP Publishing. DOI:[10.1088/1742-6596/2463/1/012069](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2463/1/012069)
27. Moore, A., Hines, S., Brown, B., Falen, C., de Haro Marti, M., Chahine, M., Norell, R., Ippolito, J., Parkinson, S. and Satterwhite, M., 2014. Soil-Plant Nutrient Interactions on Manure-Enriched Calcareous Soils. *Agronomy Journal*, 106(1), pp.73-80. DOI:[10.2134/agronj2013.0345](https://doi.org/10.2134/agronj2013.0345)
28. Ortiz, C., Pierotti, S., Molina, M.G. and Bosch-Serra, À.D., 2023. Soil fertility and phosphorus leaching in irrigated calcareous soils of the Mediterranean region. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(11), p.1376. DOI:[10.1007/s10661-023-11901-7](https://doi.org/10.1007/s10661-023-11901-7)
29. Nelson, D.W., Sommers, L.E., Page, A.L., Miller, R.H. and Keeney, D.R., 1982. Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. *Agronomy monograph*, 9, pp.539-579.
30. Parker, F.W., Nelson, W.L. and Winters, E., 1951. The broad interpretation and application of soil test information. *Agronomy Journal*, 43, pp.105-112.

31. Quesada, C.A., Paz, C., Oblitas Mendoza, E., Phillips, O.L., Saiz, G. and Lloyd, J., 2020. Variations in soil chemical and physical properties explain basin-wide Amazon forest soil carbon concentrations. *Soil*, 6(1), pp.53-88. DOI:[10.5194/soil-2019-24](https://doi.org/10.5194/soil-2019-24)
32. Ramírez, P.B., Machado, S., Singh, S., Plunkett, R. and Calderón, F.J., 2023. Addressing the effects of soil organic carbon on water retention in US Pacific Northwest wheat–soil systems. *Frontiers in Soil Science*, 3, p.1233886. DOI:[10.3389/fsoil.2023.1233886](https://doi.org/10.3389/fsoil.2023.1233886)
33. Razeghi, H.R., Safaee, F., Geranghadr, A., Ghadir, P. and Javadi, A.A., 2024. Investigating accelerated carbonation for alkali activated slag stabilized sandy soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 42(1), pp.575-592. DOI:[10.1007/s10706-023-02590-7](https://doi.org/10.1007/s10706-023-02590-7)
34. Sharma, M.P., & Shukla, A.K., 1997. *Soil Chemistry*. Rastogi Publications.
35. Sharpley, A.N. 1996. Availability of phosphorus to plants in relation to soil factors and P removal processes. *Plant and Soil*, 198, pp. 71–77.
36. Sparks, D.L., 2003. Environmental soil chemistry: An overview. *Environmental soil chemistry*, 2, pp.1-42.
37. Von Wandruszka, R., 2006. Phosphorus retention in calcareous soils and the effect of organic matter on its mobility. *Geochemical transactions*, 7, pp.1-8. <https://doi.org/10.1186/1467-4866-7-6>
38. Stewart, C.E., Paustian, K., Conant, R.T., Plante, A.F. and Six, J., 2007. Soil carbon saturation: concept, evidence and evaluation. *Biogeochemistry*, 86, pp.19-31. DOI:[10.2136/sssaj2007.0104](https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0104)
39. Usowicz, B. and Lipiec, J., 2021. Spatial variability of saturated hydraulic conductivity and its links with other soil properties at the regional scale. *Scientific Reports*, 11(1), p.8293. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86862-3>
40. Yang, M., Wang, S., Zhao, X., Gao, X. and Liu, S., 2020. Soil properties of apple orchards on China's Loess Plateau. *Science of the Total Environment*, 723, p.138041. DOI:[10.1016/j.scitotenv.2020.138041](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138041)
41. Zhang, W., Lu, J.S., Bai, J., Khan, A., Zhao, L., Wang, W., Zhu, S.G., Liu, S.T., Jin, J.M., Nyanchera, G.D. and Li, S.Q., 2024. Reduced fertilization boosts soil quality and economic benefits in semiarid apple orchard: A two-year appraisal of fertigation strategy. *Agricultural Water Management*, 295, p.108766. DOI:[10.1016/j.agwat.2024.108766](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108766)
42. Zhang, S., Wang, L., Chen, S., Fan, B., Huang, S. and 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, p.114451. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114451>
43. Zhang, M., Li, C., Li, Y. C., & Harris, W. G., 2014. Phosphate minerals and solubility in native and agricultural calcareous soils. *Geoderma*. 232, pp. 164-171. DOI:[10.1016/j.geoderma.2014.05.015](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.05.015)
44. 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. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(6), p.503. DOI:[10.1007/s10661-024-12665-4](https://doi.org/10.1007/s10661-024-12665-4)
45. Zhou, M. and Li, Y., 2001. Phosphorus-sorption characteristics of calcareous soils and limestone from the southern Everglades and adjacent farmlands. *Soil Science Society of America Journal*, 65(5), pp.1404-1412. DOI:[10.2136/sssaj2009.0137](https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0137)
46. Wang, X.Q., Zhang, X.C., Pei, X.J. and Ren, G.F., 2022. Effect of the particle size composition and dry density on the water retention characteristics of remolded loess. *Minerals*, 12(6), p.698. DOI:[10.3390/min12060698](https://doi.org/10.3390/min12060698)

47. Wang, J., & Li, X. (2023). Comprehensive analysis of soil physicochemical properties and nutrient status in apple orchards. *Agronomy*, 15(14), 1520. DOI:[10.3390/horticulturae9080903](https://doi.org/10.3390/horticulturae9080903)
48. Wang, Z., Liu, R., Fu, L., Tao, S. and Bao, J., 2023. Effects of orchard grass on soil fertility and nutritional status of fruit trees in Korla fragrant pear orchard. *Horticulturae*, 9(8), p.903. DOI:[10.3390/horticulturae9080903](https://doi.org/10.3390/horticulturae9080903)
49. Wang, S., Xu, L. and Hao, M., 2022. Impacts of long-term micronutrient fertilizer application on soil properties and micronutrient availability. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(23), p.16358. DOI: [10.3390/ijerph192316358](https://doi.org/10.3390/ijerph192316358). PMID: 36498430; PMCID: PMC9736148.

بررسی تأثیر کاربرد زئولیت و کود نانو بر عملکرد و خصوصیات آنتی اکسیدانی اسانس نعناع فلفلی در تیمارهای مختلف کم‌آبی

الناز فرج زاده معماری تبریزی^{*id}

گروه زراعت، واحد ملکان، دانشگاه آزاد اسلامی، ملکان، ایران. farajzadeh_e@malekaniiau.ac.ir

«مقاله پژوهشی»

دریافت: ۱۴۰۴/۲/۲۸ و پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۳۱

چکیده

در این تحقیق، تأثیر تنش کم‌آبی و استفاده از زئولیت همراه با کود نانو بر ویژگی‌های مختلف گیاه دارویی نعناع فلفلی، از جمله درصد اسانس، عملکرد اسانس و خواص آنتی‌اکسیدانی بررسی شد. تیمارها شامل مقدار آبیاری (آبیاری پس از ۷۰، ۱۰۰، ۱۳۰ و ۱۶۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک کلاس A) که در کرت‌های اصلی و تیمار زئولیت و کود نانو بود که در کرت‌های فرعی قرار داشت. زئولیت‌ها قبل از کاشت با کود نانو کامل تیمار شد و پس از هوا خشک نمودن به مقدار ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار با خاک محل آزمایش تا عمق ۳۰ سانتی‌متر مخلوط گردید. آزمایش در دو سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ به صورت اسپلیت پلات اجرا شد. نتایج نشان داد که تیمار تنش کم‌آبی پس از ۱۰۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک در مقایسه با شاهد به میزان ۲۶/۶ درصد موجب افزایش معنی‌دار درصد اسانس شد، در حالی که کم‌آبی شدید (پس از ۱۶۰ میلی‌متر تبخیر) تأثیر منفی بر عملکرد اسانس داشت. بیشترین مقدار اسانس (۲۴/۲٪) در تیمار ترکیبی زئولیت + کود نانو مشاهده شد که ۴۶٪ بیشتر از شاهد بود. علاوه بر این، کاربرد زئولیت و کود نانو به‌ویژه به صورت توأم، عملکرد اسانس را به‌طور چشمگیری افزایش داد. بیشترین عملکرد اسانس (۲۵/۲۲ میلی‌لیتر در مترمربع) در تیمار (آبیاری پس از ۱۰۰ میلی‌متر تبخیر + زئولیت + کود نانو) ثبت شد که ۲۶/۶٪ بیشتر از شاهد بود. همچنین، تنش کم‌آبی باعث افزایش ترکیبات آنتی‌اکسیدانی مانند آسکوربات پراکسیداز و گلوتاتیون پراکسیداز شد، به‌ویژه در ترکیب با تیمارهای با زئولیت و کود نانو. ترکیب زئولیت و کود نانو در شرایط کم‌آبی نه تنها باعث افزایش ترکیبات فنلی و فلاونوئیدی شد، بلکه ویژگی‌های آنتی‌اکسیدانی اسانس را نیز به‌طور قابل توجهی بهبود بخشید. به‌ویژه در شرایط کم‌آبی شدید، ترکیب زئولیت و کود نانو موجب کاهش میزان مالون دی‌آلدهید که نشانه‌ای از کاهش آسیب‌های سلولی بود، گردید. بنابراین نتایج آماری نشان می‌دهد که استفاده از زئولیت و کود نانو در کنار مدیریت مناسب آبیاری می‌تواند به‌طور مؤثری موجب افزایش تولید اسانس و بهبود ویژگی‌های آنتی اکسیدانی گیاه نعناع فلفلی، به‌ویژه در شرایط تنش کم‌آبی گردد.

واژه‌های کلیدی: تنش آبی، گیاه دارویی، جاذب.

*-آدرس ایمیل نویسنده مسئول: farajzadeh_e@malekaniiau.ac.ir

استناد: فرج زاده معماری تبریزی، ا.، ۱۴۰۴. بررسی تأثیر کاربرد زئولیت و کود نانو بر عملکرد و خصوصیات آنتی اکسیدانی اسانس نعناع فلفلی تحت رژیم‌های مختلف کم‌آبی. مقاله پژوهشی، نشریه پژوهش‌های خاک، (۲) ۳۹، ص ۲۲۱-۲۳۴.

مقدمه

کم آبی یکی از مشکلات جهانی است که هر ساله خسارت‌های زیادی را در کشاورزی باعث می‌شود و روز به روز بر شدت آن افزوده می‌شود. با این وجود روش‌هایی موثر برای مقابله با اثرهای کم آبی ارایه شده است. زئولیت‌ها گروهی از آلومینوسیلیکات‌های بلوری طبیعی و سنتزی هستند که دارای ساختاری از تتراهدرال‌های TO_4 پیوسته (که T می‌تواند سیلیسیم، آلومینیوم یا عناصر دیگر باشد) هستند. هر هدر از چهار اتم O که یک کاتیون را احاطه کرده‌اند، تشکیل شده است. شبکه‌های سه‌بعدی که شامل حفره‌ها و کانال‌ها هستند، به این مواد معدنی سطح وسیع و تخلخل زیادی می‌بخشند که باعث ظرفیت بالای تبادل یونی نیز می‌شود. در حال حاضر کشاورزی یکی از بخش‌های اصلی استفاده از زئولیت‌های طبیعی است. این ترکیبات می‌توانند اثرات مثبتی بر خاک‌های زراعی داشته باشند (کلاک و همکاران، ۲۰۲۱). چندین مطالعه نشان داده‌اند که استفاده از زئولیت در کشت محصولات مزایای مثبتی دارد (جاروسز و همکاران، ۲۰۲۱). زئولیت می‌تواند برای بهبود خاک‌های آلوده به فلزات سنگین و همچنین به عنوان یک کود با با توانایی رهاسازی آهسته استفاده شود (پاپادوپولوس و همکاران، ۲۰۲۱). زئولیت قدرت نفوذ ریشه‌ای را بهبود می‌بخشد و می‌تواند ساختار خاک را بهبود دهند این مسئله اجازه نفوذ بهتر آب و نگهداری آن را می‌دهد به طوری که توسط ناحلی و همکاران (نخلی و همکاران، ۲۰۱۷) به این مطلب اشاره نموده‌اند و اخیراً توسط چندین محقق دیگر نیز مورد تأکید قرار گرفته است (بلویسو و همکاران، ۲۰۲۲؛ کاسترونو و همکاران، ۲۰۲۳). با این حال پیاده‌سازی عملی زئولیت در کشاورزی مستلزم درک عمیق از تعامل آن با خواص هیدروفیزیکی خاک، بافت خاک و مدیریت آبیاری است. اعمال روش‌های صرفه‌جویی در آب در زراعت آبی ضروری است زیرا بخش کشاورزی مقدار زیادی آب مصرف می‌کند (دفرايتور و همکاران، ۲۰۱۷؛ لولوی و همکاران، ۲۰۱۹). با این وجود بسته به نوع سیستم‌های کشاورزی و سطح نوآوری‌هایی که

در مدیریت آبیاری به کار برده می‌شود آب آبیاری می‌تواند کاهش یابد (لولوی و همکاران، ۲۰۱۹). آزادسازی آهسته آب آبیاری با کاربرد زئولیت می‌تواند به عنوان یک رویکرد نوآورانه در زمان‌بندی آبیاری در نظر گرفته شود این روش شامل کاهش آب در طول آبیاری و یا دفعات آن است بدون اینکه به کاهش محصول منجر شود و در عین حال کارایی استفاده از آب را تا ۹۰ درصد در محصولات را افزایش می‌دهد (میراس آلوالوس و همکاران، ۲۰۱۶). چندین محقق کاهش مصرف آب بین ۴۳ درصد تا ۶۵ درصد را تحت تأثیر کاربرد زئولیت و افزایش تولید محصول و با کیفیت بالاتر را نشان داده‌اند (دولا و همکاران، ۲۰۱۹). بررسی‌ها نشان داده است که علاوه بر آب، زئولیت‌ها می‌توانند مواد غذایی را نیز جذب نموده و به طور موثری در اختیار گیاهان قرار دهند (بلویسو و همکاران، ۲۰۲۲). صلاح ورزی و همکاران (۲۰۲۰) در گیاه فستوکا تأثیر کاربرد زئولیت را در شرایط کم آبی بررسی نمودند. نتایج بررسی این محققین نشان داد که کاربرد زئولیت به ویژه در سطح ۲۰ درصد ویژگی‌هایی مانند وزن خشک ریشه و اندام هوایی، سطح برگ، ارتفاع بوته و محتوای کاروتنویید را در شرایط کم آبی افزایش می‌دهد. کاربرد زئولیت محتوای رطوبت نسبی را نیز در این گیاه به میزان ۲۱/۹ درصد افزایش داد. با این وجود محتوای کاروتنویید در فستوکا در شرایط ۲۵ درصد ظرفیت مزرعه‌ای به میزان ۱۵۷ درصد افزایش یافت در بررسی دیگری کاتالدو و همکاران (۲۰۲۳) مشاهده نمودند که کاربرد زئولیت مقاومت به خشکی را در انگور افزایش می‌دهد بر اساس نتایج بررسی این محققین محتوای ترکیبات قندی و ترکیبات فنلیکی انگور در شرایط کم آبی با کاربرد زئولیت به ترتیب به میزان ۱۸ و ۵۴ درصد افزایش یافت.

کودهای نانو بیولوژیکی به عنوان گزینه‌ای نویدبخش برای کشاورزی پایدار در نظر گرفته می‌شوند و علاوه بر اینکه به عنوان کودهای مغذی عمل می‌کنند مشابه کودهای سنتی هستند و خطرات زیست محیطی پایینی دارند این کودها به طور کامل یا جزئی از ترکیبات

نانوساختاری هستند که می‌توانند به گیاه منتقل شوند. این ترکیب هاجذب مؤثر یا رهاسازی آهسته مواد فعال را امکان‌پذیر می‌کند (السادونی و همکاران، ۲۰۲۱؛ الرمدی و همکاران، ۲۰۲۳). هدف از کاربرد کودهای نانو افزایش دسترسی گیاه به مواد مغذی همراه با بهبود کارایی استفاده از آنهاست. این کودها همچنین به کاهش مقدار کود کمک می‌کنند که این امر به کاهش هزینه‌های کشت و حذف آلودگی محیط زیست به ویژه خاک و منابع آب زیرزمینی منجر می‌شود. در نانوتکنولوژی مواد دارای قطر فیزیکی بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر در حداقل یک بعد هستند (شلابی و همکاران، ۲۰۲۲). خصوصیات قابل توجه نانو ذرات مانند نسبت سطح به حجم بالا و خواص بهبود یافته اپتو الکترونیکی و فیزیکوشیمیایی به عنوان راهی برای تقویت رشد و تولید گیاهان بسیار مفید هستند (پربانکا و همکاران، ۲۰۲۲). نانو ذرات یا از اجزای گیاهی مختلف به روش‌های شیمیایی، فیزیکی، مکانیکی یا بیولوژیکی با استفاده از نانوتکنولوژی جمع‌آوری می‌شوند یا نسخه‌های سنتزی یا تغییر یافته از مواد اولیه مورد استفاده به عنوان کودهای معدنی هستند. به دلیل ویژگی‌های خاصشان نانوذرات^۱ ممکن است تأثیر متفاوتی بر فرآیندهای متابولیکی گیاه نسبت به مواد سنتی داشته باشند. این ترکیبات ممکن است بتوانند مواد مغذی طبیعی غیر متحرک مانند فسفر را در ریزوسفر متحرک کنند و بیشتر در دسترس گیاهان قرار دهند (السادونی و همکاران، ۲۰۲۱). نسبت به کودهای معدنی، کودهای نانو بسیار مؤثر تر عمل می‌کنند و می‌توانند با افزایش پارامترهای رشد مانند ارتفاع گیاه، تعداد برگ‌ها، مساحت برگ، تولید ماده خشک و رنگدانه‌های فتوسنتزی، به بهبود عملکرد کمک کنند (زائو و همکاران، ۲۰۲۳). نانوذرات ممکن است برای امنیت غذایی حیاتی باشند و به عنوان اجزای بنیادی برای رشد عملکرد کشاورزی در نظر گرفته شوند زمانی که این کودهای نانو NPK^۱ برای تأمین مواد مغذی مورد نیاز گیاهان استفاده می‌شوند رشد و

عملکرد گیاهان به طور مؤثری بهبود می‌یابد (نوفال و همکاران، ۲۰۲۴).

با استفاده از اسپری برگ نانو ریزمغذی‌ها می‌توانند به طور مؤثری استفاده شوند. تحقیقات نشان داده است که عملکرد اقتصادی و تولید بیوماس انواع محصولات مختلف با نانو ریزمغذی‌ها افزایش می‌یابد (جانمحمدی و صباغ نیا، ۲۰۲۳؛ محمد و الفلاحی، ۲۰۲۳). اسپری‌های ترکیبی نانو با نانوذرات ریزمغذی‌هایی مانند روی، آهن، مس، منگنز، بور، مولیبدن، منیزیم، گوگرد و روی پایدارتر بوده و برای گیاهان کارایی بهتری دارند. سنتز کلروفیل و برخی کربوهیدرات‌ها، همچنین تبدیل نشاسته به قندها به نانو روی وابسته است. حضور آن در بافت گیاهی همچنین به گیاهان کمک می‌کند تا در برابر دماهای سرد مقاومت کنند. از سوی دیگر نانو آهن برای حفظ ساختار و عملکرد کلروپلاست ضروری است و در تولید کلروفیل نقش دارد (سینگ و همکاران، ۲۰۲۳). تحت استرس خشکی اسپری نانو آهن بر روی گیاهان گلرنگ بیوماس، تعداد گل تولید شده در هر گیاه و سایر اجزای تولید بذر را افزایش داد (قیاسی و همکاران، ۲۰۲۳). علاوه بر این محمد و الفلاحی (۲۰۲۳) دریافتند که برای تمام شاخص‌های رشد رویشی از جمله ارتفاع گیاه، مساحت برگ، وزن خشک و کلروفیل اسپری کود نانو NPK و نانو ریزمغذی‌ها بر روی ذرت بسیار مؤثر بود. دارمانینگتاس و همکاران (۲۰۲۳) در برنج مشاهده نمودند که کاربرد نانو کود آهن میزان آسیب به غشای سلول‌های برنج را تحت شرایط کم آبی به میزان ۱۷ درصد کاهش می‌دهد این محققین افزایش فعالیت‌های آنتی اکسیدانی را از مهمترین دلایل این بهبود عنوان نمودند. در بررسی دیگری مباشر و همکاران (۲۰۲۳) تأثیر کاربرد کود نانو را بر رشد و خصوصیات بیوشیمیایی گوجه فرنگی در شرایط خشکی بررسی نمودند نتایج بررسی این محققین نشان داد که کاربرد این کود طول بوته، وزن خشک اندام هوایی، تعداد برگ، محتوای کلروفیل برگ، محتوای کاروتنویید و محتوای ترکیبات فنولیکی را بهبود بخشید.

¹ NPK (NPK-NPs)

مواد و روش‌ها

این آزمایش در دو سال زراعی ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ در مزرعه دانشکده کشاورزی شهرستان ملکان استان آذربایجان شرقی اجرا شد. محل مورد آزمایش در پنج کیلومتری شمال غربی شهر تبریز در ارتفاع ۱۴۰۲ متری از سطح دریای آزاد قرار دارد. این منطقه از نظر تقسیمات آب و هوایی کشور دارای رژیم دمایی فریک با متوسط دمای سالیانه خاک بین ۵ الی ۱۵ درجه سانتیگراد و رژیم رطوبتی زیریک (نیمه خشک) و خاک محل آزمایش دارای بافت سیلتی-لوم بود. نمونه برداری از خاک جهت تجزیه خاک از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی متری خاک انجام شد نتایج تجزیه خاک در جدول یک آمده است.

همچنین کاربرد کود نانو محتوای رطوبت نسبی برگ، ترکیبات قندی محلول برگ و محتوای فلاونوئید برگ را افزایش داد. با توجه به گفته‌های فوق هدف از این مطالعه بررسی تاثیر کاربرد ژئولیت و کود نانو بر عملکرد و خصوصیات آنتی اکسیدانی اسانس نعنای فلفلی تحت رژیم های مختلف کم آبی بود تا تاثیر ژئولیت بر کارایی مصرف کود های نانو که از تکنولوژی های مدرن به شمار می رود بررسی شود. لازم به ذکر است که ژئولیت با جذب کود ها این ترکیبات را در طول دوره رشد در اختیار گیاه قرار می دهد. به این دلیل کاربرد توام ژئولیت و کود نانو بررسی شد.

جدول ۱- تجزیه خاک محل مورد بررسی

Clay رس	Silt سیلت	Sand شن	SP (%)	OC (%)	CCE (%)	EC (dS.m ⁻¹)	T.N.V (%)	N (%)	P (mg kg ⁻¹)	K (mg kg ⁻¹)
			ظرفیت اشباع خاک		درصد کربنات کلسیم	هدایت الکتریکی	درصد مواد خنثی شونده	نیتروژن	فسفر	پتاسیم
41	33	36	52	1.02	2.11	0.97	49	0.02	10.3	166

سطوح آبیاری: آبیاری پس از ۷۰، ۱۰۰، ۱۳۰ و ۱۶۰ میلی متر تبخیر از تشتک. اعمال تیمارهای کم آبی پس از استقرار کامل بوته های نعنای فلفلی و سه هفته پس از کاشت اعمال شد بر اساس دبی ورودی در هر دور آبیاری برای هر کرت ۲ متر مکعب در اختیار گیاه قرار داده شد که قدرت نفوذ تا عمق ۴۵ سانتی متری خاک را داشت. ۱۳ دور آبیاری برای تیمار آبیاری پس از ۷۰ میلی متر تبخیر از تشتک، ۱۰ دور آبیاری برای تیمار آبیاری پس از ۱۰۰ میلی متر تبخیر از تشتک، ۸ دور آبیاری برای تیمار آبیاری پس از ۱۳۰ میلی متر تبخیر از تشتک و ۵ دور آبیاری برای تیمار آبیاری پس از ۱۶۰ میلی متر تبخیر از تشتک انجام شد. تشتک تبخیر در وسط مزرعه تعبیه گردید تا منعکس کننده نیاز آبی مزرعه باشد.

تیمار ژئولیت و کود نانو: شاهد، کاربرد ژئولیت، کاربرد کود نانو و کاربرد ژئولیت و کود نانو. ژئولیت ها قبل از کاشت با کود نانو کامل تیمار شدند و پس از هوا خشک نمودن به مقدار ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار با خاک

بذرهای نعنای فلفلی رقم صبا از مرکز تحقیقات کشاورزی آذرشهر تهیه شد. کاشت در سال اول در اواسط اردیبهشت ماه انجام شد به منظور انجام طرح پس از شخم، دیسک و مسطح کردن خاک در اواخر اسفند ماه اقدام به کرت بندی زمین شد. اندازه هر کرت آزمایشی ۶ متر مربع و شامل پانزده خط کاشت بود. فاصله بین ردیف ها ۲۰ سانتی متر در نظر گرفته شد و فاصله بوته ها روی ردیف از یکدیگر ده سانتی متر در نظر گرفته شد پس از کاشت بلافاصله آبیاری انجام شد لازم به ذکر است که در این تحقیق از مواد شیمیایی جهت کنترل علف های هرز و آفات استفاده نشد. هر سال در شروع فصل رشد جدید برای سله شکنی از کج بیل و چهار شاخ فلزی با عمق کم استفاده شد تا جوانه ها با سهولت بیشتری از خاک بیرون آمده و رشد مطلوبی داشته باشند اولین آبیاری بلافاصله پس از کاشت در اواسط اردیبهشت ماه انجام شد. آبیاری دوم یک هفته بعد انجام شد در این بررسی تیمارهای مورد مطالعه به قرار زیر بود.

محل آزمایش تا عمق ۳۰ سانتی متر مخلوط شدند. زئولیت مورد استفاده از نوع کلینوپتیلولیت تهیه شده از معادن میانه بود. کود نانو مورد استفاده کود نانو مایع ده ایکس شوک آمریکا بود که حاوی عناصر میکرو و ماکرو و اسید هیومیک و فولویک بود. در پایان فصل زراعی نمونه خاک از عمق صفر تا سی سانتیمتری ریزوسفر گیاه یعنی در اوایل خردادماه دو سال مورد مطالعه در مزارع که سالها به کشت یونجه اختصاص داشتند و سابقه هیچگونه مصرف کود را نداشتند برداشت شد. بر اساس تجزیه خاک، خاک محل مورد مطالعه قلیایی بوده و فاقد هر گونه شوری قابل ملاحظه است. نمونه های برگ در اوایل مهر ماه از برگ های سبز نمونه گیری شد. جهت اندازه گیری مقادیر کلروفیل کل از روش آرنون استفاده شد (بانوی بختیاری و همکاران، ۱۳۹۵). نمونه برداری و برداشت در هر دو سال از اوایل مرداد ماه انجام و تا اواسط شهریور ماه ادامه داشت. جهت تعیین فعالیت آنتی اکسیدانی کل گلبرگ نعناع فلفلی از روش اندازه گیری کاهش ظرفیت رادیکالی و با کمک ۲،۲ دی فنیل ۱-پیکریل هیدرازیل (DPPH) استفاده گردید (صادقی و کامکار، ۱۳۹۷). اسانس نعناع فلفلی از چهل گرم بخش های هوایی خشک نعناع فلفلی استخراج شد که با ۴۰۰ میلی لیتر آب مخلوط و به مدت سه ساعت با استفاده از دستگاه کلونجر^۲ تقطیر شد پس از استخراج اسانس نمونه ها با افزودن سولفات سدیم خشک شدند و در دمای چهار درجه سانتی گراد برای آنالیز شیمیایی نگهداری شدند (حجتی و برزگر، ۲۰۱۷). بازده اسانس نعناع فلفلی بر اساس معادله زیر محاسبه شد:

درصد اسانس = (اسانس استخراج شده توسط تقطیر با

آب/ ۴۰ گرم اندام هوایی نعناع فلفلی) $\times 100$

برای تعیین غلظت مالون دی الدئید و محتوای پرولین با استفاده از روش اسپکتروفتومتری (امان و همکاران، ۲۰۲۱) اندازه گیری سوپراکسید دیسموتاز با توجه به دیندسا و همکاران (۱۹۸۱) اندازه گیری آسکوربات پراکسیداز با کمک روش ارایه شده توسط چن و همکاران

(۱۹۹۲) فعالیت گلاکسول پراکسیداز توسط روش ارایه شده توسط مالهلی و چانس (۱۹۵۴) اندازه گیری ترکیبات فنولیکی توسط روش فولین-سیوکالتو و اندازه گیری فلاونوئید ها با استفاده از روش کلریمتریک اندازه گیری شد (فهمیده و همکاران، ۲۰۱۹). آزمون مهار رادیکال آزاد یکی از مهمترین آزمون ها جهت سنجش فعالیت عصاره گیاهی می باشد. از این روش برای تعیین خاصیت آنتی اکسیدانی اسانس استفاده شد. از روش DPPH به این منظور استفاده شد (فهمیده و همکاران، ۲۰۱۹).

نمونه برداری از چهار خط میانی انجام شد. اندازه گیری شاخص ها و صفات در مرحله قبل از گلدهی انجام شد. تجزیه واریانس مرکب صفات با استفاده از نرم افزار SPSS انجام شد. از آزمون دانکن در سطح پنج درصد برای مقایسه میانگین داده ها استفاده شد.

نتایج و بحث

بر اساس نتایج تجزیه واریانس صفات (جدول ۲) اثر اصلی تنش کم آبی و تیمار زئولیت غنی شده با کود های نانو اثر معنی داری بر درصد اسانس نعناع فلفلی داشت (جدول ۳). مطالعه مقایسه میانگین های درصد اسانس تحت تاثیر سطوح آبیاری نشان داد که کم آبی افزایش معنی داری را در درصد اسانس باعث شد بین دو تیمار آبیاری پس از ۷۰ میلی متر تبخیر از تشتک و آبیاری پس از ۱۰۰ میلی متر تبخیر از تشتک از نظر درصد اسانس اختلاف معنی داری وجود نداشت ولی در آبیاری پس از ۱۳۰ میلی متر تبخیر از تشتک درصد اسانس بیشتری در مقایسه با آبیاری پس از ۷۰ میلی متر تبخیر از تشتک به دست آمد. در آبیاری پس از ۱۳۰ میلی متر تبخیر از تشتک درصد اسانس در مقایسه با آبیاری پس از ۷۰ میلی متر تبخیر از تشتک به میزان ۱۷ درصد بیشتر بود با این وجود تشدید کم آبی نه تنها تاثیر مثبتی بر درصد اسانس گیاه نعناع فلفلی نداشت بلکه به شدت از تولید اسانس گیاه دارویی نعناع فلفلی کاست (جدول ۳). نتایج بررسی حاضر نشان می دهد

ثانویه را مختل می‌کند و از این طریق باعث کاهش تولید ترکیب‌های ثانویه می‌شود (راما کریشنا و راواشینکار، ۲۰۱۱).

که کم‌آبی متوسط (آبیاری پس از ۱۰۰ میلی‌متر تبخیر از تشک) بر درصد اسانس نعنای فلفلی می‌افزاید چرا که مطالعات نشان داده است که افزایش فعالیت مسیر تولید ترکیبات ثانوی یکی از مکانیسم‌های مقابله با کم‌آبی است چرا که ترکیباتی که توسط مسیرهای تولید ترکیب‌های ثانویه تولید می‌شوند در مقاومت به خشکی نقش دارند (موتوسامی و لی، ۲۰۲۴). با این وجود مطالعات نشان داده است که کم‌آبی شدید حتی مسیرهای تولید ترکیب‌های

جدول ۲- تجزیه واریانس صفات مورد بررسی در نعنای فلفلی

SOD سوپر اکسید دیسموتاز	GPX گلوتاتیون پراکسیداز	APX آسکوربات پراکسیداز	Total antioxidant properties خصوصیت آنتی اکسیدانی	Essential oil yield عملکرد اسانس	Essential oil % درصد اسانس	Df درجه آزادی	s.o.v منابع تغییر
19.35*	0.16	28.6*	1	5.8	0.001	1	Year سال
9*	5.2	4.6	0.76	8.38*	18.2	4	Rep (year) تکرار در سال
587.44**	869.94	600.21**	153.74**	236.88**	300.11**	3	Irrigation regimes رژیم آبیاری
10.81*	23.62	7.57	0.96	6.94*	3.06	3	Year* Irrigation regimes سال*رژیم آبیاری
2.21	4.37	4.38	1.74	1.9	11.56	12	Main error خطای اصلی
20.83	16.47	18.63	17.81**	155.77**	206.96**	3	Nano-zeolite نانو-زئولیت
6.76	3.4	8.81	4.43	3.08	4.36	3	Year*Nano-zeolite سال* نانو زئولیت
22.34	32.88	19.25*	11.07**	17.9*	18.38	9	Irrigation regimes*Nano-Zeolite رژیم آبیاری*نانو زئولیت
17.07	4.79	6.93	2.41	7.18	1.97	9	Year*irrigation regimes*Nano zeolite سال*رژیم آبیاری* نانو زئولیت
12.81	8.88	8.66	1.60	8.54	9.37	48	Error خطا
21.19	16.78	17.38	6.53	16.14	16.4		c.v% ضریب تغییرات

**و* به ترتیب نشان‌دهنده معناداری در سطح احتمال یک و پنج درصد هستند.

ادامه جدول ۲- تجزیه واریانس صفات مورد بررسی در نعنای فلفلی

s.o.v منابع تغییر	Df درجه آزادی	MDA مالون دی آلدهید	Proline محتوای پرولین	Total phenolic content کل محتوای فنولیکی	Total flavonoid content کل محتوای فلاونویدی	E.O antioxidant properties خصوصیات آنتی اکسیدانی
Year سال	1	10.27	1.08	5.85	5.8	0.03
Rep (year) تکرار در سال	4	4.39	6.75	8.13	14.76	9.62
Irrigation regimes رژیم آبیاری	3	333.42**	638.96**	612.21**	844.36**	852.64**
Year* Irrigation regimes سال*رژیم آبیاری	3	1	12.91	8.41	7.41	3.84
Main error خطای اصلی	12	11.63	5.9	3.49	6.47	4.35
Nano-zeolite نانو-زئولیت	3	46.14*	25.79*	122.68**	38*	29.6*
Year*Nano-zeolite سال* نانو زئولیت	3	5.89	3.05	12.26	18.5	4.26
Irrigation regimes*Nano- Zeolite رژیم آبیاری*نانو زئولیت	9	25.17**	25.05**	18.89	23.2*	14.89
Year*irrigation regimes*Nano zeolite سال*رژیم آبیاری* نانو زئولیت	9	4.69	9.26	14.39	13.17	13.76
Error خطا	48	12.09	8.5	10.33	10.77	7.7
c.v% ضریب تغییرات		18.2	17.02	17.21	17.04	6.3

**و* به ترتیب نشان دهنده معناداری در سطح احتمال یک و پنج درصد هستند.

جدول ۳- مقایسه میانگین های صفات مورد بررسی تحت تاثیر سطوح آبیاری

Irrigation regimes (mm evaporation from evaporation pan) رژیم آبیاری (میلی متر تبخیر از تشتک)	E.O% درصد اسانس	SOD سوپراکسید دیسموتاز	Total phenolic content (µg of GA mg-1 of dry extract) کل محتوای ترکیبات فنولیکی	E.O antioxidant properties (µ/ml) خصوصیت آنتی اکسیدانی اسانس
70	22.02 a	22.14 a	13.48 d	38.05 d
100	20.09 ab	20.05 b	15.26 c	40.01 c
130	18.80 b	13.22 c	22.38 b	47.52 b
160	13.75 c	12.15 d	23.59 a	50.55 a

می توان به آهن و روی اشاره داشت که در ساختار آنزیم های درگیر در تولید اسانس دخالت دارند (ویرداک، ۲۰۱۳). محققین گزارش نمودند که در گیاه دارویی کاربرد کودهای میکرو میزان تولید اسانس را افزایش می دهد (کومار و همکاران، ۲۰۲۲). از سوی دیگر با توجه به این حقایق حفظ عناصر غذایی به مدت طولانی تر در ناحیه توسعه ریشه ها نیز می تواند مهم باشد چرا که مطالعات نشان داده است که زئولیت ها با جذب عناصر غذایی در ساختار خود از

در این مطالعه کاربرد زئولیت و کود نانو به ویژه به صورت توأم درصد اسانس گیاه دارویی نعنای فلفلی را افزایش می دهد. بیشترین درصد اسانس نعنای فلفلی با ۲۴/۲ درصد در تیمار کاربرد کود زئولیت + کود نانو به دست آمد که در مقایسه با شاهد به میزان ۴۶ درصد بیشتر بود. کاربرد انفرادی زئولیت و کود نانو نیز درصد اسانس را با شدت کمتری افزایش داد (جدول ۴). گیاهان برای تولید اسانس به تعدادی از عناصر غذایی نیاز دارند که از آن جمله

شستشوی عناصر غذایی جلوگیری نموده و مواد غذایی را به مدت بیشتری در اختیار گیاه قرار می دهند (فریرا و همکاران، ۲۰۲۳). با توجه به این مطلب کاربرد توأم زئولیت و کود نانو می تواند تاثیر کودهای نانو را به طور موثری افزایش دهد.

جدول ۴- مقایسه میانگین های صفات مورد بررسی تحت تاثیر نانو-زئولیت

Nano-zeolite نانو زئولیت	E.O% درصد اسانس	Total phenolic content (μg of GA mg^{-1} of dry extract) کل محتوای ترکیبات فنولیکی	E.O antioxidant properties ($\mu\text{g}/\text{ml}$) خصوصیت آنتی اکسیدانی اسانس
Control شاهد	15.34 c	16.66 c	42.41 b
Zeolite زئولیت	18.81 b	17.18 c	44.38 a
Nano نانو	18.05 b	19.24 b	44.42 a
nano-zeolite نانو زئولیت	22.46 a	21.63 a	44.92 a

عملکرد اسانس نعناع فلفلی را کاهش می دهد با این وجود نعناع فلفلی را می توان بدون کاهش معنی داری در عملکرد اسانس با آبیاری پس از ۱۳۰ میلی متر تبخیر از تشتک کشت نمود ولی مطلوبتر آن خواهد بود که بوته های نعناع فلفلی با سطح آبیاری آبیاری پس از ۱۰۰ میلی متر تبخیر از تشتک کشت شود و به ویژه همراه با کاربرد کود زئولیت+کود نانو. امامی و همکاران (۲۰۲۴) نیز طی مطالعه ای نشان داد که کم آبی متوسط باعث افزایش عملکرد اسانس ۲۰ گیاه دارویی می شود ولی تشدید کم آبی باعث کاهش عملکرد اسانس می شود. در بررسی حاضر در آبیاری پس از ۷۰ میلی متر تبخیر از تشتک تیمارهای کاربرد زئولیت، کاربرد کود نانو و کاربرد کود زئولیت + کود نانو تاثیری بر عملکرد اسانس نداشت ولی در سطوح کم آبی کاربرد زئولیت و کاربرد کود نانو و به ویژه به صورت توأم تاثیر مثبتی بر عملکرد اسانس گیاه دارویی نعناع فلفلی می گذارد. محمد و گاتس (۲۰۱۶) تاثیر کاربرد زئولیت و کود شیمیایی را در گیاه دارویی *Viola odorata* L مطالعه نموده و مشاهده نمودند که کاربرد توأم دو نهاده باعث افزایش عملکرد اسانس این گیاه دارویی می شود.

در بررسی حاضر عملکرد اسانس گیاه دارویی نعناع فلفلی به طور معنی داری تحت تاثیر بر هم کنش سطوح آبیاری و زئولیت و کود نانو قرار گرفت (جدول ۲). با توجه به نتایج حاصل از این بررسی بیشترین عملکرد اسانس نعناع فلفلی با ۲۵/۲۲ میلی لیتر در متر مربع در تیمار آبیاری پس از ۱۰۰ میلی متر تبخیر از تشتک + کاربرد کود زئولیت+کود نانو به دست آمد که در مقایسه با شاهد به میزان ۲۶/۶ درصد بیشتر بود (جدول ۵). این نتایج نشان می دهد که کم آبی ضعیف (آبیاری پس از ۱۰۰ میلی متر تبخیر از تشتک) به همراه کاربرد کود زئولیت غنی شده با کودهای نانو مطلوبترین تیمار جهت افزایش عملکرد اسانس نعناع فلفلی به شمار می رود. در کم آبی شدیدتر نتایج متفاوتی به دست آمد. در تمامی سطوح کود نانو و زئولیت از نظر عملکرد اسانس بین آبیاری پس از ۷۰ میلی متر تبخیر از تشتک و آبیاری پس از ۱۳۰ میلی متر تبخیر از تشتک وجود نداشت ولی در آبیاری پس از ۱۶۰ میلی متر تبخیر از تشتک عملکرد اسانس کمتری در مقایسه با آبیاری پس از ۷۰ میلی متر تبخیر از تشتک به دست آمد لذا با توجه به نتایج تشدید کم آبی و ایجاد کم آبی شدید

جدول ۵- مقایسه میانگین های صفات مورد بررسی تحت تاثیر سطوح آبیاری و تیمار ژئولیت و نانو

Irrigation regimes (mm evaporation from evaporation pan)	Nano-zeolite	E.O yield (gr/ha)	Total antioxidant properties	APX ($\mu\text{mol}/\text{min}/\text{mg}$ protein)	GPX ($\mu\text{mol}/\text{min}/\text{mg}$ protein)	Total flavonoid content μg of RU mg^{-1} of dry extract)	MDA ($\mu\text{mol}/\text{g}$ - 1FW)	Prolin ($\mu\text{mol}/\text{g}$ fr wt)
رژیم آبیاری (میلی متر تبخیر از تشتک)	نانو ژئولیت	عملکرد اسانس	خصوصیت آنتی اکسیدانی	آسکوربات پراکسیداز	گلوتاتیون پراکسیداز	کل محتوای ترکیبات فلاونویدی	مالون دی آلدهید	محتوای پرولین
70	Control	19.90 bc	16.20 f	13.15 e	12.80 e	12.08 g	12.43 g	12.28 c
70	شاهد	18.02 c	15.95 f	13.02 e	12.92 e	12.30 fg	15.47 e-g	12.78 c
70	Zeolite	19.37 bc	16.87 ef	10.43 e	10.50 e	13.80 fg	17.80 d-f	10.52 c
70	ژئولیت	22.93 ab	17.47 ef	12.23 e	12.55 e	14.57 fg	19.87 c-e	13.13 c
100	Control	18.55 c	17.27 ef	16.62 d	16.68 d	14.62 fg	14.97 fg	18.33 b
100	شاهد	19.00 c	16.92 ef	12.52 e	12.62 e	14.00 fg	14.77 fg	12.58 c
100	Zeolite	19.38 bc	18.37 de	12.93 e	12.62 e	15.70 fg	16.08 e-g	12.50 c
100	ژئولیت	25.22 a	19.10 cd	10.50 e	10.45 e	16.48 ef	19.93 c-e	10.50 c
130	Nano	14.20 d	19.90 cd	21.37 a-c	21.92 bc	19.65 de	21.28 b-d	19.55 ab
130	نانو	20.03 bc	20.72 c	22.12 ab	21.52 bc	25.25 a-c	18.17 d-f	22.28 a
130	nano-zeolite	18.60 c	20.70 c	19.32 b-d	21.25 bc	22.10 cd	19.18 d-f	20.32 ab
130	نانو ژئولیت	19.98 bc	24.78 a	18.27 cd	21.93 bc	28.20 a	18.58 d-f	17.45 b
160	Control	10.48 e	22.27 b	21.18 a-c	20.33 c	24.72 a-c	24.20 a-c	23.20 a
160	شاهد	13.18 de	20.45 c	21.02 a-c	28.40 a	24.28 a-c	24.48 ab	22.67 a
160	Zeolite	12.08 de	23.33 ab	23.03 a	23.55 bc	26.60 ab	22.40 a-d	23.27 a
160	ژئولیت	18.83 c	20.28 c	23.37 a	24.30 b	23.92 bc	26.18 a	22.83 a

در بررسی حاضر کل محتوای آنتی اکسیدانی، آسکوربات پراکسیداز و گلوتاتیون پراکسیداز تحت تاثیر برهم کنش سطوح آبیاری و ژئولیت همراه با کود نانو قرار گرفت با این وجود در میزان فعالیت سوپراکسید دسیموتاز تنها اثر اصلی سطوح آبیاری معنی دار بود با بررسی کلی محتوای آنتی اکسیدانی مشاهده شد که بیشترین میزان در تیمار آبیاری پس از ۱۳۰ میلی متر تبخیر از تشتک + کاربرد کود ژئولیت + کود نانو به دست آمد، با این وجود بیشترین میزان آسکوربات پراکسیداز در تیمارهای آبیاری پس از ۱۶۰ میلی متر تبخیر از تشتک + کاربرد کود نانو و آبیاری پس از ۱۶۰ میلی متر تبخیر از تشتک + کاربرد کود ژئولیت + کود نانو و بهترین فعالیت گلوتاتیون پراکسیداز در آبیاری پس از ۱۶۰ میلی متر تبخیر از تشتک + کاربرد ژئولیت حاصل شد.

بر اساس نتایج در سطوح پایین کم آبی (آبیاری پس از ۷۰ میلی متر تبخیر از تشتک و آبیاری پس از ۱۰۰ میلی متر تبخیر از تشتک) اختلافی بین سطوح تیماری ژئولیت و کود نانو وجود نداشت ولی با تشدید کم آبی این

تیمارها اختلاف خود را بر جای گذاشتند در کل محتوای آنتی اکسیدانی و آسکوربات پراکسیداز در صورت کاربرد توام ژئولیت و کود نانو بیشترین مقدار به دست آمد در حالی که در فعالیت گلوتاتیون پراکسیداز در تیمار ژئولیت به تنهایی بیشترین مقدار حاصل گردید در کل نتایج بررسی حاضر نشان می دهد که تشدید کم آبی و کاربرد کود نانو و ژئولیت باعث افزایش خاصیت آنتی اکسیدانی و میزان فعالیت آنتی اکسیدانت ها می شود (جدول ۴). بررسی ها نشان داده که کم آبی میزان تولید آنتی اکسیدانت ها را افزایش می دهد تا توانایی گیاه در برابر تنش های محیطی افزایش یابد (موتوسامی و لی، ۲۰۲۴). از سوی دیگر علاوه بر تنش های محیطی تعدادی از عوامل مانند کاربرد کودها نیز میزان تولید آنتی اکسیدانت ها را در گیاهان افزایش داده و باعث تحریک فعالیت آنتی اکسیدان ها و بهبود شرایط درونی گیاه در شرایط تنش و عدم تنش می شود (موتوسامی و لی، ۲۰۲۴). چنانچه در بررسی حاضر نیز مشاهده شد که کم آبی و کاربرد کودها بر میزان تولید آنتی اکسیدانت ها می افزاید اما ژئولیت نیز با بهبود نگهداری

مواد غذایی در ناحیه توسعه ریشه نتیجه ای مشابه با کاربرد کودها دارد (فریرا و همکاران، ۲۰۲۲). در بررسی حاضر میزان فعالیت سوپراکسید دسیموتاز نیز تحت تاثیر کم آبی افزایش یافت (جدول ۳) ولی کاربرد زئولیت و نانو تاثیر معنی داری بر میزان فعالیت سوپراکسید دسیموتاز نداشت (جدول ۲).

در بررسی حاضر نتایج مشابهی از نظر محتوای پروتئین در مقایسه با سایر آنتی اکسیدانت ها به دست آمد در این بررسی کم آبی در تمامی سطوح تیماری کود نانو و زئولیت بر محتوای پرولین افزود از این نظر در تمامی سطوح تیماری کود نانو و زئولیت تیمار آبیاری پس از ۱۶۰ میلی متر تبخیر از تشک افزایش مشابهی را در محتوای پرولین باعث شد ولی سطوح پایین کم آبی در سطوح مختلف تیماری کود نانو و زئولیت اختلاف نشان دادند به طوری که در کاربرد زئولیت با کاهش آب آبیاری از آبیاری پس از ۷۰ میلی متر تبخیر از تشک به آبیاری پس از ۱۳۰ میلی متر تبخیر از تشک افزایش بیشتری در محتوای پرولین در مقایسه با کاربرد کود زئولیت + کود نانو به دست آمد در حالی که در شاهد با کاهش آب آبیاری از آبیاری پس از ۷۰ میلی متر تبخیر از تشک به آبیاری پس از ۱۰۰ میلی متر تبخیر از تشک کاهش کمتری در محتوای پرولین در مقایسه با کاربرد زئولیت، کاربرد کود نانو و کاربرد کود زئولیت + کود نانو به دست آمد (جدول ۵). این نتایج می توان بیانگر این مطلب باشد که در کم آبی های پایین (آبیاری پس از ۱۰۰ میلی متر تبخیر از تشک) اعمال تیمارهای کودی و زئولیت می تواند نیاز به تولید آنتی اکسیدانت‌ها جهت مقابله با کم آبی را کاهش دهد. نتایج مشابهی در سایر بررسی ها نیز گزارش شده است (فریرا و همکاران، ۲۰۲۲). نتایج حاصل از مقایسه میانگین های محتوای مالون دی آلدئید تحت تاثیر بر هم کش کم آبی در ترکیب های تیماری کودی و زئولیت نیز نشان می دهد که کاربرد کود نانو و زئولیت به ویژه به صورت توأم از میزان تولید مالون دی آلدئید به ویژه در شرایط کم آبی می کاهد که نشان دهنده نقش محافظتی این ترکیب ها از

تخریب سلولی و شرایط کم آبی است (جدول ۵). کودها از طریق افزایش پایداری غشاهای سلولی و اجزای سلول و تولید ترکیبات مقابله کننده با اکسیدانت ها، تولید مالون دی آلدئید را کاهش می دهد (کاسترونوو و همکاران، ۲۰۲۰). در بررسی حاضر کل محتوای ترکیبات فنلی در اثر کم آبی افزایش یافت. کم آبی شدید آبیاری پس از ۱۶۰ میلی متر تبخیر از تشک محتوای ترکیبات فنلی را در برگ های نعنای فلفلی تا ۷۵ درصد افزایش داد (جدول ۳). ترکیبات فنلی از ترکیب های موثر در گیاه برای مقابله با شرایط نامساعد محیطی مانند کم آبی است (پارک و همکاران، ۲۰۲۳). از سوی دیگر نتایج بررسی حاضر نشان داد که کاربرد کود نانو و ترکیبی از کود نانو و زئولیت محتوای ترکیبات فلفلی را تا ۱۵ و ۳۰/۱ درصد افزایش می دهد (جدول ۴) که این افزایش می تواند در مقاومت به خشکی در گیاه موثر باشد. در بررسی حاضر محتوای فلاونوئیدها نیز تحت تاثیر کم آبی و کاربرد کود نانو و زئولیت افزایش یافت. به طوری که بیشترین کل محتوای فلاونوئیدی در تیمار آبیاری پس از ۱۳۰ میلی متر تبخیر از تشک + کاربرد کود زئولیت + کود نانو به دست آمد که در مقایسه با شاهد به میزان ۱۳۵ درصد افزایش داد که افزایش قابل ملاحظه ای به شمار می رود (جدول ۵). فلاونوئیدها به تنظیم فعالیت سلولی و مقابله با رادیکال های آزاد که باعث استرس اکسیداتیو می شوند کمک می کنند (پارک و همکاران، ۲۰۲۳). در بررسی حاضر خاصیت آنتی اکسیدانی اساسی نعنای فلفلی مورد بررسی قرار گرفت. کم آبی خاصیت آنتی اکسیدانت اساسی نعنای فلفلی را افزایش داد بیشترین خاصیت آنتی اکسیدانی در آبیاری پس از ۱۶۰ میلی متر تبخیر از تشک به دست آمد در این تیمار خاصیت آنتی اکسیدانی در مقابله با آبیاری پس از ۷۰ میلی متر تبخیر از تشک به میزان ۳۲/۸ درصد بیشتر بود (جدول ۲). علاوه بر آن تمامی تیمارهای کاربرد زئولیت، کاربرد کود نانو و کاربرد کود زئولیت + کود نانو افزایش معنی دار و مشابهی را در خاصیت آنتی اکسیدانی اساسی نعنای فلفلی باعث شده و این صفت را تا ۵/۸ درصد افزایش داد (جدول ۳). فرهودی (۲۰۱۳) نیز در گیاه دارویی

رزماری نشان داد که کاربرد کودها و کم آبی خاصیت آنتی اکسیدانی اسانس را افزایش می دهد.

نتیجه گیری کلی

بر اساس نتایج تجزیه واریانس اثر اصلی تنش کم آبی و تیمار ژئولیت نانو غنی شده به طور معنی داری بر بسیاری از صفات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی نعنای فلفلی تأثیرگذار بود. مهم ترین آن ها درصد اسانس، عملکرد اسانس، ترکیبات فنولی، فلاونوئیدی، فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی، پرولین و MDA بودند. آبیاری پس از ۱۳۰ میلی متر تبخیر از تشتک بیشترین درصد اسانس را ایجاد کرد و در مقایسه با آبیاری پس از ۷۰ میلی متر، ۱۷ درصد افزایش در اسانس مشاهده شد با این حال شدت بالای تنش آبی موجب کاهش عملکرد کلی اسانس و افزایش آسیب اکسیداتیو شد. کم آبی متوسط (آبیاری پس از ۱۰۰ میلی متر تبخیر) بهترین پاسخ را در بیشتر صفات داشت این سطح از تنش موجب فعال سازی مسیرهای تولید ترکیبات ثانویه شد که در دفاع گیاه نقش دارند به طور کلی اثر آبیاری و ژئولیت بر درصد اسانس به ترتیب با میانگین مربعات ۳۰۰/۱۱ و ۲۰۶/۹۶ در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود. همچنین عملکرد اسانس نیز به طور معنی داری تحت تأثیر این دو عامل قرار گرفت (به ترتیب ۲۳۶/۸۸ و ۱۵۵/۷۷). این یافته ها بیانگر نقش هم افزایی تنش کنترل شده آبی و استفاده از ژئولیت نانو در ارتقاء کیفیت گیاه دارویی هستند. علاوه بر آن ترکیبات فنولی کل (۶۳۸/۹۶) و فلاونوئیدی

(۶۱۲/۲۱) نیز تحت تأثیر تیمارهای آبیاری به صورت معنی دار افزایش یافتند ژئولیت نانو نیز اثر تقویتی بر این ترکیبات داشت. همچنین فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی نظیر APX (600.21) و SOD (587.44) به شکل محسوسی در تیمارهای کم آبی متوسط و در حضور نانو ژئولیت افزایش یافتند این آنزیم ها در حذف رادیکال های آزاد و کاهش استرس اکسیداتیو مؤثر بودند. در نهایت مقدار پرولین که به عنوان شاخصی از تنظیم اسمزی شناخته می شود در شرایط کم آبی با میانگین مربع ۳۳۳/۴۲ افزایش یافت. هم زمان MDA به عنوان نشانگر آسیب غشایی نیز در تنش شدید افزایش نشان داد که بیانگر افزایش آسیب سلولی بود؛ اما کاربرد ژئولیت نانو باعث کاهش MDA شد و نقش حفاظتی برای سلول ایفا کرد.

به طور خلاصه می توان نتیجه گرفت که استفاده از ژئولیت نانو غنی شده در کنار آبیاری پس از ۱۰۰ میلی متر تبخیر بهترین ترکیب برای حفظ کیفیت و کمیت ترکیبات دارویی نعنای فلفلی بوده و موجب بهبود تولید اسانس، افزایش ترکیبات آنتی اکسیدانی و کاهش آسیب های ناشی از تنش شد. این یافته ها می توانند به عنوان راهبردی مؤثر در مدیریت تنش آبی در گیاهان دارویی مورد استفاده قرار گیرند.

سپاسگزاری

بدین وسیله از حوزه معاونت پژوهش دانشگاه آزاد اسلامی ملکان نهایت تشکر و قدردانی می گردد.

References

1. Belviso, C., Satriani, A., Lovelli, S., Comegna, A., Coppola, A., Dragonetti, G., Cavalcante, G. and Rivelli, A. R. 2022. Impact of zeolite from coal fly ash on soil hydrophysical properties and plant growth. *Agriculture*, 12(3): 356.
2. Bistgani, Z., Barker, A. and Hashemi, M. 2024. Physiology of medicinal and aromatic plants under drought stress. *The Crop Journal*, 12: 330-339.
3. Castronuovo, D., Comegna, A., Belviso, C., Satriani, A. and Lovelli, S. 2023. Zeolite and ascophyllum nodosum- based biostimulant effects on spinach gas exchange and growth. *Agriculture*, 13: 754.
4. de Fraiture, C., Wichelns, D., Rockstrom, J., Kemp-Benedict, E., Eriyagama, N., Gordon, L. J., Hanjra, M. A., Hoogeveen, J., Huber-Lee, A. and Karlberg, L. 2007. Looking ahead to 2050: scenarios of alternative investment approaches. In *Water for food, water for life: a comprehensive assessment of water management in agriculture*. Molden, David (Ed.) London, UK, 2007; Earthscan; Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI), pp.91-145.
5. Doula, M. K., Elaiopoulos, K., Kouloubis, P. and Zorpas, A. A. 2018. In situ application of clinoptilolite to improve compost quality produced from pistachio bio-wastes. *Fresenius Environ. Bull.* 27(3): 1312-1318.
6. Doula, M. K., Zorpas, A. A., Inglezakis, V., Navvaro Pedreno, J. and Bilalis, D. J. 2019. Optimization of heavy polluted soil from olive mill waste through the implementation of zeolites. *J. Environ. Eng. Manage*, 18(2): 1297-1309.
7. El-Ramady, H., Abdalla, N., Sári, D., Ferroudj, A., Muthu, A., Prokisch, J., Fawzy, Z.F., Brevik, E.C. and Solberg, S.Ø. 2023. Nanofarming: Promising solutions for the future of the global agricultural industry. *Agronomy*, 13 (6): 1600.
8. El-Saadony, M.T., Almoshadak, A.S., Shafi, M.E., Albaqami, N.M., Saad, A.M., El-Tahan, A.M., Desoky, E-S.M., Elnahal, A.S., Almakas, A. and Abd El-Mageed, T.A. 2021. Vital roles of sustainable nano-fertilizers in improving plant quality and quantity-an updated review. *Saudi journal of biological sciences*, 28 (12): 7349-7359.
9. Farhoudi, R. 2013. Effect of drought stress on chemical constituents, photosynthesis and antioxidant properties of rosmarinus officinalis essential Oil. *Journal of Medicinal plants and By-Products*, 2(1): 17-22.
10. Ferreira, A.P., Almeida-Aguiar, C., Costa, S.P.G. and Neves, I.C. 2022. Essential Oils Encapsulated in Zeolite Structures as Delivery Systems (EODS): An Overview. *Molecules*, 27(23): 8525.
11. Ghiyasi, M., Rezaee Danesh, Y., Amirnia, R., Najafi, S., Mulet, J.M. and Porcel, R. 2023. Foliar Applications of ZnO and its nanoparticles increase safflower (*Carthamus tinctorius* L.) growth and yield under water stress. *Agronomy*, 13 (1): 192.
12. Guang-Cheng, S., Na, L., Zhan-Yu, Z., Shuang-En, Y. and Chang-ren, C. 2010. Growth, yield and water use efficiency response of greenhouse-grown hot pepper under Time-Space deficit irrigation. *Sci. Hortic*, 126(2): 172- 179.
13. Janmohammadi, M. and Sabaghnia, N. 2023. Effects of foliar spray of nano-micronutrient and growth regulators on safflower (*Carthamus tinctorius* L.) performance. *Plant Nano Biology*, 5:100045.
14. Jarosz, R., Szerement, J., Gondek, K., Mierzwa-Hersztek, M. 2022. The use of zeolites as an addition to fertilisers – A review. *Catena*, 213: 106125.
15. Khapte, P.S., Kumar, P., Burman, U. and Kumar, P. 2019. Deficit irrigation in tomato: Agronomical and physio- biochemical implications. *Sci. Hortic*, 248: 256-264.
16. Kumar, D., Punetha, A., Verma, P. S. and Padalia, R.C. 2022. Micronutrient based approach to increase yield and quality of essential oil in aromatic crops. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 26: 126-137.
17. Lovelli, S. 2019. Dryland farming and the agronomic management of crops in arid environments. *J. Agron*, 18: 49–54.

18. Mirás-Avalos, J. M., Pérez-Sarmiento, F., Alcobendas, R., Alarcón, J. J., Mounzer, O. and Nicolás, E. 2016. Using midday stem water potential for scheduling deficit irrigation in mid-late maturing peach trees under Mediterranean conditions. *Irrigation Sci*, 34: 161-173.
19. Mohamed, Y.F. and Ghatas, Y.A. 2016. Effect of mineral, biofertilizer (EM) and zeolite on growth, flowering, yield and composition of volatile oil of *Viola odorata* L. *Plants*, 7: 78-89.
20. Molyneux, P. 2004. The use of the stable free radical diphenylpicrylhydrazyl (DPPH) for estimating antioxidant activity. *Songklanakarin J. Sci. Technol*, 26(2): 211-219.
21. Muhammad, I., Mirza, H., El-Sappah Ahmed, H., Fawad, Z., Nawab, K., Ali, R., Mohammad, S., Shamshad, K., Manzar, M., Muhammad Jawad, A., Jia, D., Xianming, Z. and Xin, Z. 2023. Primary plant nutrients modulate the reactive oxygen species metabolism and mitigate the impact of cold stress in overseeded perennial ryegrass. *Frontiers in Plant Science*, 14: 113-123.
22. Muhammad, O. and Al-Falahi, M. 2023. Effect of spraying nano fertilizer npk and nano fertilizer microelements on the growth characteristics of maize plants (*Zea Mays* L.). In: IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*. vol 1. IOP Publishing, p 012063.
23. Muthusamy, M. and SI, L. 2024. Abiotic stress-induced secondary metabolite production in Brassica: opportunities and challenges. *Front. Plant Sci*, 14: 1323085.
24. Nakhli, S.A.A., Delkash, M., Bakhshayesh, B.E. and Kazemian, H. 2017. Application of zeolites for sustainable agriculture: a review on water and nutrient retention. *Water Air Soil Poll*, 228: 464.
25. Nofal, E., Menesy, F., Elbably, S., Abd-El Rahman, M., El-nRamady, H. and Prokisch, J. 2024a. Response of *Kigelia africana* (Lam.) Benth Transplants to Nano-NPK and Nano-Chitosan under Salinity Stress. *Egyptian Journal of Soil Science*, 64 (2): 661 – 672.
26. Nofal, E., Menesy, F., Elbably, S., Abd-ElRahman, M., El- Ramady, H. and Prokisch, J. 2024b. Nano-NPK and Nano-sulfur boost vegetative growth and chemical constituents of african mahogany (*Khaya senegalensis* L.) seedlings under saline soil conditions. *Egyptian Journal of Soil Science*, 64 (2): 631-642.
27. Nurzyńska-Wierdak, R. 2013. Does mineral fertilization modify essential oil content and chemical composition in medicinal plants? *Acta Sci. Pol., Hortorum Cultus*, 12(5): 3-16.
28. Papadopoulos, A.V., Doula, M.K., Zorpas, A.A., Kosmidis, S., Assimakopoulou, A. and Kolovos, C. 2020. Pepper cultivation on a substrate consisting of soil, natural zeolite, and olive mill waste sludge: changes in soil properties. *Comptes Rendus. Chimie*, 23(11-12): 721-732.
29. Park, Y., Do Yeon, K., Song Yi, K., To Quyen, T., Sung-Chul, H., Jaeyoung, C., Jinyoung, S. and Sang Min, K. 2023. Identification of drought-responsive phenolic compounds and their biosynthetic regulation under drought stress in *Ligularia fischeri*. *Frontiers in Plant Scienc*, 12: 56-69.
30. Pereira, L.S., Oweis, T. and Zairi, A. 2002. Irrigation management under water scarcity. *Agr. Water Manage*, 57(3): 175-206.
31. Priyanka, T.S., Kerketta, A., Topno, S.E., Mohiddin, S.G. and Tripathi, P. 2022. Effect nano zeolite, nano micronutrients and biocapsules on plant growth, head yield and quality of broccoli (*Brassica oleracea* var Italica). *International Journal of Environment and Climate Change*, 12 (11): 58-65.
32. Ramakrishna, A. and Aswathanarayana Ravishankar, G. 2011. Influence of abiotic stress signals on secondary metabolites in plants. *Plant Signaling*, 6: 1720-1731.
33. Shalaby, T.A., Bayoumi, Y., Eid, Y., Elbasiouny, H., Elbehiry, F., Prokisch, J., El-Ramady, H. and Ling, W. 2022a. Can nanofertilizers mitigate multiple environmental stresses for higher crop productivity? *Sustainability*, 14 (6): 3480.

34. Shalaby, T.A., El-Bialy, S.M., El-Mahrouk, M.E., Omara, A.E.D., El-Beltagi, H.S. and El-Ramady, H. 2022b. Acclimatization of in vitro banana seedlings using root-applied bio-nanofertilizer of copper and selenium. *Agronomy*, 12 (2): 539.
35. Singh, R.K., Mishra, S. and Bahadur, V. 2023. Effect of nano- chitosan, nano-micronutrients and bio capsules on vegetative growth, flowering and fruiting attributes of strawberry (+) cv. winter dawn. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*, 54: 13401-13411
36. Szatanik-Kloc, A., Szerement, J., Adamczuk, A. and Józefaciuk, G. 2021. Effect of Low Zeolite Doses on Plants and Soil Physicochemical Properties. *Materials*, 14: 2617.
37. Wang, Y., Chen, J., Sun, Y., Jiao, Y., Yang, Y., Yuan, X., Erik Lærke, P., Wu, Q. and Chi, D. 2023. Zeolite reduces N leaching and runoff loss while increasing rice yields under alternate wetting and drying irrigation regime. *Agr. Water Manage*, 277: 108130.
38. Zhao, L., Zhou, X., Kang, Z., Peralta-Videa, J.R. and Zhu, Y.G. 2023. Nano-enabled seed treatment: A new and sustainable approach to engineering climate-resilient crops. *Science of the Total Environment*, 5:168640.

بررسی اثر تغییر کاربری اراضی بر کیفیت خاک با استفاده از شاخص‌های ترکیبی و تحلیل داده‌های جامع و حداقلی

سمیرا همتی^{۱*}، کامران مروج^۲، میرناصر نویدی^۳، احمد گلچین^۴ و محمدصادق عسکری^۵

۱- نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. s.hemmati@znu.ac.ir

۲- دانشیار، گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. kmoravej@znu.ac.ir

۳- دانشیار، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. nnavidi@swri.ir

۴- استاد، گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. agolchin2011@yahoo.com

۵- دانشیار، گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. askari@znu.ac.ir

«مقاله پژوهشی»

دریافت: ۱۴۰۴/۴/۲۱ و پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۳۱

چکیده

تغییر کاربری اراضی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک و در نهایت کیفیت کلی آن به شمار می‌رود. هدف پژوهش حاضر ارزیابی اثر تبدیل اراضی بایر با پوشش طبیعی نیمه‌بیابانی به باغ‌های زیتون بر کیفیت خاک در منطقه لوشان استان گیلان بود. به این منظور، ۷۶ نمونه خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر در دو کاربری (بایر و باغ زیتون) برداشت شد و ۲۴ ویژگی فیزیکی، شیمیایی و زیستی آن اندازه‌گیری شد. شاخص کیفیت خاک (SQI) بر اساس دو مدل محاسباتی شامل شاخص تجمعی ساده (SQIA) و شاخص تجمعی وزنی (SQIW) و با استفاده از دو مجموعه داده، یعنی مجموعه کامل ویژگی‌ها (TDS) و مجموعه حداقلی (MDS)، محاسبه گردید. برای انتخاب ویژگی‌های کلیدی، از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) بهره‌گیری شد. در اراضی بایر، ویژگی‌هایی مانند جرم مخصوص ظاهری، کربن آلی، هدایت الکتریکی، منیزیم، ظرفیت تبادل کاتیونی، نسبت جذب سدیم، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و کربنات کلسیم در مجموعه حداقلی قرار گرفتند؛ در حالی که در باغ‌های زیتون، درصد رس، کربن آلی، تنفس میکروبی، فسفر قابل جذب، سدیم، نسبت جذب سدیم و کربنات کلسیم به‌عنوان مهم‌ترین ویژگی‌ها شناسایی شدند. نتایج نشان داد که کیفیت خاک در باغ‌های زیتون به‌طور معناداری بالاتر از اراضی بایر است؛ به‌طوری‌که مقادیر شاخص کیفیت خاک در باغ زیتون بین ۰/۷۵ تا ۰/۷۹ و در اراضی بایر بین ۰/۴۱ تا ۰/۴۸ متغیر بود. افزون بر این، مجموعه داده‌های حداقلی با کاهش متغیرها و حفظ دقت، کارایی مناسبی نسبت به مجموعه کامل ویژگی‌ها داشت. همچنین، شاخص‌های وزنی به دلیل لحاظ کردن اهمیت نسبی متغیرها، ابزار دقیق‌تری برای تحلیل کیفیت خاک فراهم کردند. در مجموع، نتایج بیانگر آن است که تغییر کاربری اراضی بایر به باغ‌های زیتون در شرایط نیمه‌خشک می‌تواند به بهبود چشمگیر کیفیت خاک منجر شود. کاربرد شاخص‌های کمی مبتنی بر مجموعه حداقلی و مدل وزنی نیز رویکردی کارآمد برای پایش و مدیریت پایدار خاک در مقیاس منطقه‌ای پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، سلامت خاک، شاخص کیفیت خاک.

* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: A.majidi@areeo.ac.ir

استاد: همتی، س.، مروج، ک.، نویدی، م. ن.، گلچین، ا.، و عسکری، م. ص. ۱۴۰۴. بررسی اثر تغییر کاربری اراضی بر کیفیت خاک با استفاده از شاخص‌های ترکیبی و تحلیل داده‌های جامع و حداقلی. مقاله پژوهشی، نشریه پژوهش‌های خاک، (۲) ۳۹، ص ۲۴۶-۲۳۵.



مقدمه

در دهه‌های اخیر، توسعه مناطق کشاورزی و شهری و بهره‌برداری بیشتر از منابع طبیعی جهت برآوردن رشد روزافزون نیاز انسان‌ها باعث تغییرات چشمگیری در استفاده از اراضی شده و تغییر کاربری اراضی را به عنوان یکی از چالش‌های عمده در قرن بیست و یک تبدیل کرده است (Fu et al., 2025). تغییر کاربری زمین یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک به شمار می‌رود که به‌طور قابل توجهی بر جهت و میزان تغییرات در کیفیت خاک اثر می‌گذارد (Yeneneh et al., 2024; Shuite et al., 2025). تأثیر کاربری اراضی بر کیفیت خاک را می‌توان از طریق کمی‌سازی شاخص کیفیت خاک^۱ (SQI) در کاربری‌های مختلف زمین و شرایط مدیریتی که تحت محیط‌های مکانی یا بیوفیزیکی مشابه عمل می‌کنند، ارزیابی نمود (Lemenih, 2004; Okolo et al., 2019). بنابراین، کمی کردن کیفیت خاک و بررسی آثار ناشی از تغییر کاربری اراضی روش کلیدی برای بهره‌برداری پایدار از مدیریت کاربری زمین است (Nabiollahi et al., 2018). روش‌های مختلفی برای جمع‌آوری داده‌ها و اندازه‌گیری و ارزیابی کیفیت خاک از روش‌های عمدتاً کیفی تا کاملاً کمی، از جمله کارت‌های امتیاز، ارزیابی‌های بصری خاک، کیت‌های میدانی، روش‌های زمین‌آماري و تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی استفاده شده است (Andrews et al., 2004). پارامترهای مؤثر بر شاخص‌های کیفیت خاک در قالب فرآیندها و ویژگی‌های خاک، به عنوان شاخص‌هایی تعریف می‌شوند که نسبت به تغییرات مدیریتی حساس‌اند. این ویژگی‌ها می‌توانند مجموعه‌ای از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی، زیستی یا ترکیبی از این ویژگی‌ها باشند (Zeraatpisheh et al., 2020; Yeneneh et al., 2024;)

(Shuite et al., 2025). انتخاب مجموعه داده مناسب برای محاسبه شاخص کیفیت خاک می‌تواند به دو روش انجام شود: کل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک^۲ (TDS) که شامل تمامی ویژگی‌های اندازه‌گیری شده است و حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک^۳ (MDS) که با استفاده از تکنیک‌های آماری چند متغیره، مانند تحلیل عاملی^۴ (FA)، آنالیز مؤلفه‌های اصلی^۵ (PCA) و رگرسیون حداقل مربعات جزئی^۶ (PLSR)، مهم‌ترین و تأثیرگذارترین ویژگی‌ها را انتخاب می‌کند (Raiesi, 2017; Maleki et al., 2022). ایجاد یک مجموعه داده حداقل از پارامترهای کلیدی کیفیت خاک از بین کلیه ویژگی‌های خاک اندازه‌گیری شده، یک گام اساسی در ارزیابی کمی کیفیت خاک است. این رویکرد کل مجموعه داده‌ها را به حداقل می‌رساند، اطلاعات معتبر را به حداکثر می‌رساند و افزونگی داده‌ها را کاهش می‌دهد (Andrews et al., 2004; Raiesi, 2017). مطالعات متعددی نشان داده است که استفاده از MDS می‌تواند با کاهش تعداد شاخص‌ها، کارایی ارزیابی کیفیت خاک را افزایش دهد (Hemmati et al., 2023; Shuite et al., 2025). با این حال، این تکنیک‌ها گاهی اوقات در انتخاب معیارهایی که منعکس‌کننده تفاوت در کیفیت خاک در بین انواع مختلف بهره‌برداری هستند، بی اثر هستند؛ بنابراین نحوه انتخاب شاخص‌های کلیدی در MDS به‌طور عینی برای تولید مدل‌های کیفیت خاک قابل اعتماد و دقیق، هم یک چالش اصلی و هم یک عامل حیاتی برای انجام یک ارزیابی مؤثر و کامل از کیفیت خاک در مقیاس منطقه‌ای است (Martín-Sanz et al., 2022). از آنجا که تفسیر متغیرهای زیاد و نتیجه‌گیری از آن‌ها پیچیده است، توصیه می‌شود که مجموعه متغیرها در یک شاخص ترکیب شوند. این کار با ترکیب داده‌ها و اعمال وزن مناسب به هر متغیر انجام می‌شود. در حال حاضر، شاخص‌های کمی زیادی مانند شاخص کیفیت تجمعی ساده^۷ (SQIA)، شاخص

^۶ Partial Least Squares Regression^۷ Simple additive integrated quality index^۱ Soil quality index^۲ Total data set^۳ Minimum data set^۴ Factor analysis^۵ Principle component analysis

کیفیت تجمعی وزنی^۱ (SQI_w) و شاخص کیفیت نمورو^۲ (NQI) برای ارزیابی کیفیت خاک توسعه یافته‌اند (Zeraatpisheh et al., 2020; Rangzan et al., 2025). Nabialahi و همکاران (۲۰۱۸) با کمی‌سازی ویژگی‌های خاک، شاخص‌های کیفیت را به منظور بررسی تأثیر شیب و تغییر کاربری در اراضی کشاورزی استان کردستان ارزیابی کردند. آن‌ها از ده ویژگی مؤثر بر کیفیت خاک شامل pH، هدایت الکتریکی، کربن آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی، درصد کربنات کلسیم، فرسایش‌پذیری خاک، تخلخل، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، جرم مخصوص ظاهری و نرخ هدر رفت خاک استفاده نموده و سه شاخص کیفیت خاک شامل تجمعی ساده، وزنی و نمورو را محاسبه کردند. هریک از شاخص‌های کیفیت خاک با استفاده از دو روش امتیازدهی خطی و غیرخطی و دو رویکرد انتخاب شاخص خاک، مجموعه TDS و مجموعه MDS محاسبه شدند. نتایج نشان داد کیفیت خاک با استفاده از SQI_w ($R^2=0.78$) در مقایسه با SQI_A و NQI بهتر برآورد شد. میرخانی و همکاران (۱۴۰۲) نیز در مطالعه‌ای به منظور ارزیابی کیفیت خاک از سه مدل شاخص کیفیت خاک (شاخص‌های کیفیت تجمعی ساده، تجمعی وزنی و نمورو) و دو رویکرد انتخاب شاخص (مجموعه داده‌های کل و مجموعه داده‌های حداقل) استفاده نمودند. نتایج این مطالعه نشان داد، همه شاخص‌های مورد استفاده دارای توانایی قابل قبولی برای تعیین کیفیت خاک هستند.

تغییر کاربری اراضی می‌تواند اثرات متفاوتی بر کیفیت خاک داشته باشد. برای مثال تبدیل جنگل‌ها و مراتع بومی به زمین‌های زراعی می‌تواند منجر به تخریب شدید خاک شود. از طرف دیگر تغییر کاربری اراضی از بایر به اراضی کشاورزی و باغ‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌عنوان راهکاری برای بهبود بهره‌وری زمین و افزایش پایداری اکوسیستم‌ها مورد بررسی قرار گرفته است (Shuite et al., 2025). مطالعات متعددی تأثیر تغییر کاربری اراضی

بر کیفیت خاک را بررسی کرده‌اند. برای مثال، در مطالعه‌ای در جنوب شرقی ایالات متحده، مشاهده شد که باغ‌های میوه با افزایش سن، بهبودهایی در ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک مانند ماده آلی، کربن فعال و عناصر مغذی خاک را نشان می‌دهند. این نتایج نشان می‌دهد که تغییر کاربری اراضی به باغ‌های درختی می‌تواند به مرور زمان کیفیت خاک را بهبود بخشد (Slade and Wells, 2022). در پژوهش دیگری، زاهدی‌فر (۲۰۲۳) شاخص کیفیت خاک و مقدار تخریب آن را در کاربری‌های جنگل، زمین-های زراعی و مرتع ارزیابی نمود. نتایج نشان داد مقدار SQI در زمین‌های زراعی کمترین مقدار را داشته و مقادیر مواد آلی، غلظت عناصر روی و منگنز در مقایسه با سایر ویژگی‌ها نسبت به تغییر کاربری حساس‌تر هستند. تقی‌پور و همکاران (۱۴۰۲)، در پژوهشی اثر تغییر کاربری بر کیفیت خاک را در منطقه توتکابن استان گیلان مورد ارزیابی قراردادند. نتایج نشان داد در کاربری‌های جنگل و زراعی، کیفیت خاک به‌طور معنی‌داری بیشتر از مراتع بود. مولایی آرپناهی و همکاران (۱۳۹۹)، اثر تغییر کاربری اراضی در کاربری‌های جنگل، باغ گردو، زمین کشاورزی و جنگل تخریب‌شده را بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در منطقه بازفت استان چهارمحال بختیاری مورد بررسی قراردادند. نتایج این تحقیق نشان داد که تخریب جنگل موجب کاهش شدید کیفیت خاک می‌شود. با این وجود تغییر کاربری از کشاورزی به باغ گردو منجر به بهبود کیفیت خاک شده است.

اثرات دقیق تغییر کاربری بر کیفیت خاک می‌تواند بسته به شرایط محلی، مدیریت باغ و ویژگی‌های خاک متفاوت باشد. از این رو، ارزیابی جامع کیفیت خاک با بهره‌گیری از شاخص‌های کمی و روش‌های علمی معتبر، برای تحلیل دقیق این اثرات و تدوین راهبردهای مدیریتی ضروری است. منطقه لوشان در استان گیلان دارای کاربری-های مختلف از جمله شالیزارهای برنج، باغ‌های زیتون و

² Nemero quality index

¹Weighted additive integrated quality index

مواد و روش‌ها

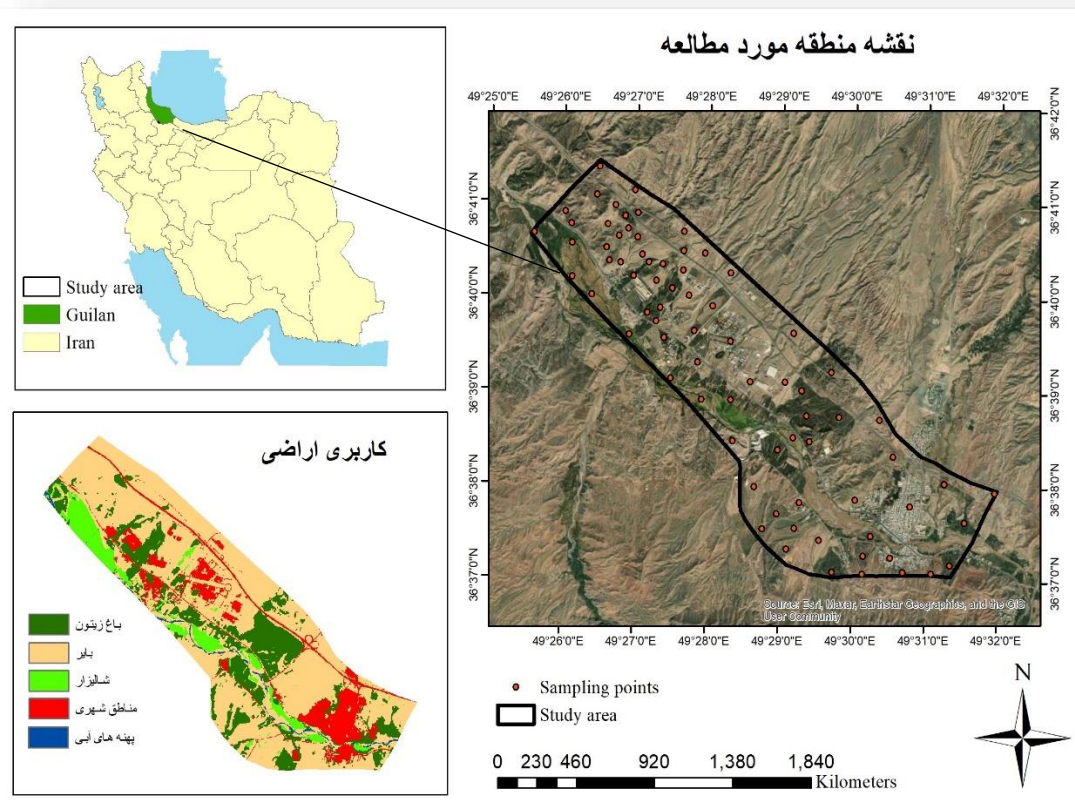
مشخصات منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه با وسعتی حدود ۳۰۰۰ هکتار، در محدوده لوشان از توابع شهرستان رودبار در استان گیلان واقع در شمال ایران قرار دارد. این منطقه در سامانه مختصاتی UTM، در زون ۳۹ بین نقاط ۳۶ درجه و ۳۶ دقیقه و ۳۶ درجه و ۴۲ دقیقه شمالی و ۴۹ درجه و ۲۵ دقیقه و ۴۹ درجه و ۳۲ دقیقه شرقی قرار دارد (شکل ۱). براساس داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی، میانگین بارندگی سالانه این منطقه ۲۷۳ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه حدود ۱۷ درجه سلسیوس و میانگین رطوبت نسبی ۶۰ درصد است. ارتفاع منطقه بین ۲۷۰ تا ۵۸۰ متر از سطح دریا متغیر است. خاک منطقه در دو رده اریدی سول^۱ و انتی سول^۲ قرار دارد (USDA). اقلیم منطقه لوشان از نوع نیمه‌خشک است که مهم‌ترین ویژگی غالب آن بارش کم و خشکی هوا است. این منطقه دارای انواع مختلف کاربری اراضی از جمله شالیزار، باغ‌های زیتون، بدنه‌های آبی، مناطق شهری و زمین‌های بایر است. آب‌وهوای مناسب این منطقه برای کشت زیتون بسیار مطلوب است. به همین دلیل این منطقه در سال‌های اخیر تغییرات قابل‌توجهی در کاربری زمین داشته است و بسیاری از زمین‌های بایر به باغ‌های زیتون تبدیل شده‌اند (عاکف و رحیمی، ۱۳۸۶).

زمین‌های بایر با پوشش طبیعی نیمه بیابانی است. اقلیم مناسب، همراه با حمایت‌های دولتی و نهادی، زمینه گسترش باغ‌های زیتون را در منطقه فراهم کرده است. در نتیجه، این منطقه تغییرات قابل‌توجهی را در کاربری زمین تجربه کرده است به‌طوری‌که بسیاری از زمین‌های بایر به باغ‌های زیتون تبدیل شده‌اند. باوجود اهمیت این منطقه به‌عنوان یکی از قطب‌های کشت زیتون کشور، تاکنون پژوهش جامعی در زمینه تأثیر تغییر کاربری اراضی بر کیفیت خاک آن انجام نشده است. در نتیجه، اطلاعات موجود در مورد اثرات کشت زیتون بر کیفیت خاک منطقه بسیار محدود است؛ بنابراین هدف اصلی این پژوهش ارزیابی کیفیت خاک پس از تبدیل خاک‌های بکر با پوشش طبیعی نیمه بیابانی به باغ‌های زیتون است. در این پژوهش فرض بر این است که تغییر کاربری اراضی بایر به باغ‌های زیتون می‌تواند بهبود کیفیت خاک را در پی داشته باشد. نتایج این مطالعه می‌تواند به درک بهتر تأثیرات تغییر کاربری اراضی بر کیفیت خاک کمک کند و راهکارهای مدیریتی مناسبی برای بهبود پایداری کشاورزی و حفظ اکوسیستم ارائه دهد.

^۲ Entisols

^۱ Aridisols



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه، نقاط نمونه‌برداری و کاربری اراضی منطقه

ارزیابی کیفیت خاک

به منظور بررسی تغییرات کیفیت در کاربری‌های مختلف، ابتدا از هر کاربری (باغ زیتون و اراضی بایر) تعداد ۳۸ نمونه خاک ($n_{total} = 76$) به روش تصادفی از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر برداشت شده و در آزمایشگاه در شرایط دمای محیط خشک شدند. برای مطالعات زیستی، نمونه‌ها مطابق با روش‌های استاندارد و با استفاده از تجهیزات استریل برداشت شده، تحت شرایط زنجیره^۱ سرد به محیط‌های مناسب انتقال داده شدند و تا زمان انجام آزمایش‌ها در دمای ۴ درجه سلسیوس در یخچال نگهداری شدند (حیدری و همکاران، ۱۴۰۱).

برای تحلیل کیفیت خاک، مجموعه‌ای از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی به عنوان شاخص‌های مؤثر در نظر گرفته شد (Reynolds et al., 2009). آزمایش‌های فیزیکی شامل تعیین بافت خاک (درصد رس، سیلت و شن) با استفاده از روش هیدرومتری با قرائت کامل (Gee et al., 1986)، تعیین چگالی ظاهری با روش کلوخه و پارافین (Blake and Hartge, 1986)، اندازه‌گیری پایداری خاکدانه‌ها^۲ (MWD) از طریق روش الک تر (Kemper et al., 1986) و تعیین مقدار رس قابل انتشار در آب^۳ (DC) با استفاده از روش هیدرومتری بود (Gee et al., 1986). اندازه‌گیری اسیدیته خاک در نسبت ۱:۱ خاک به آب با استفاده از pH متر انجام شد

¹ Cold chain

² Mean weigh diameter

³ Water-dispersible clay

که در این رابطه، (Cs) ذخیره کربن آلی خاک بر حسب کیلوگرم بر هکتار، (SOC) کربن آلی خاک بر حسب درصد، (BD) جرم مخصوص ظاهری خاک بر حسب گرم بر سانتیمتر مکعب و (D) عمق خاک بر حسب متر می‌باشد.

به‌منظور ارزیابی جامع کیفیت خاک، شاخص کیفیت خاک با استفاده از روش‌های کمی استاندارد تعیین گردید. ابتدا حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک از میان کل ویژگی‌ها با استفاده از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی استخراج شد. سپس به‌منظور ساده‌سازی ساختار مؤلفه‌ها و افزایش تبیین‌پذیری، چرخش عاملی از نوع واریماکس^۸ اعمال شد. ویژگی‌هایی که دارای بار عاملی بالا در مؤلفه‌های منتخب بودند، به‌عنوان متغیرهای کلیدی تعیین و به‌عنوان MDS در محاسبه شاخص کیفیت خاک استفاده شدند (Andrews et al., 2004).

با توجه به این‌که ویژگی‌های موردبررسی دارای واحدهای گوناگونی می‌باشند، برای این‌که بتوان آن‌ها را در قالب یک شاخص کلی درآورد، باید ویژگی‌های مورد مطالعه را بی‌واحد کرد. بدین منظور، از توابع عضویت فازی غیرخطی استفاده شد. این توابع، مقادیر هر ویژگی را در بازه‌ای بین صفر (کمترین مطلوبیت) تا یک (بیشترین مطلوبیت) نرمال‌سازی می‌کنند. به این ترتیب تابعی به دست می‌آید که با استفاده از آن مقادیر ویژگی موردنظر بین صفر (کمترین مطلوبیت برای کیفیت خاک) و ۱ (بیشترین مطلوبیت برای کیفیت خاک) نمره‌دهی می‌شود (Yanbing et al., 2009; Bandyopadhyay and Maiti, 2021). با استفاده از روابط ۲ ویژگی‌های موردبررسی برای هر نمونه خاک نمره‌دهی می‌شوند:

(Knudsen et al., 1982). قابلیت هدایت الکتریکی^۱ (EC) از طریق عصاره اشباع اندازه‌گیری شد (Rhoades, 1982). مقدار کربن آلی باروش واکلی و بلک (Walkley and Black, 1934)، نیتروژن کل با روش کج‌لدال (Bremner and Mulvaney, 1982) و فسفر قابل‌استفاده با روش اولسن اندازه‌گیری شدند (Olsen et al., 1954). غلظت سدیم^۲ (Na) و پتاسیم قابل‌استفاده^۳ (K) در عصاره اشباع با استفاده از فلیمتومتر (Knudsen et al., 1982) و مقادیر کلسیم^۴ (Ca) و منیزیم^۵ (Mg) محلول در عصاره اشباع با استفاده از روش کمپلکسومتری (Page et al., 1989)، تعیین شد. ظرفیت تبادل کاتیونی^۶ (CEC) با روش استخراج با استات سدیم یک مولار در پ هاش ۸/۲ اندازه‌گیری شد (Bower et al., 1952).

برای ارزیابی ویژگی‌های زیستی خاک، نمونه‌ها در مهر ماه سال ۱۴۰۳ برداشت شده و سپس تنفس میکروبی خاک^۷ (BR) از طریق تیتراسیون (Anderson, 1982)، کربن زیست‌توده میکروبی^۸ (MBC) با روش تدخین-استخراج (Beck, et al., 1997) تعیین گردیدند. همچنین نسبت میکروبی^۹ (MQ) به‌صورت نسبت کربن زیست‌توده میکروبی به کربن آلی خاک و ضریب متابولیک میکروبی^{۱۰} (qCO₂) نیز به‌عنوان میزان دی‌اکسید کربن تولیدشده ناشی از تنفس هر واحد زیست‌توده میکروبی در واحد زمان محاسبه گردید و با واحد g⁻¹C_{mic} h⁻¹ mgCO₂-C گزارش شد (Anderson et al., 2010).

ذخیره کربن آلی کل^{۱۱} (CS) در کاربری‌های باغ زیتون و بایر با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد (Poplau and Don, 2013):

$$C_S = SOC \times BD \times D \times 10^4 \quad \text{رابطه (۱)}$$

⁸ Microbial Biomass Carbon

⁹ Microbial ratio

¹⁰ Microbial metabolic rate

¹¹ Carbon Storage

¹² Varimax

¹ Electrical conductivity

² Sodium

³ Potassium

⁴ Calcium

⁵ Magnesium

⁶ Cation exchange capacity

⁷ Basal respiration

رابطه (۲)

در این رابطه W_i وزن تعلق یافته به هر ویژگی خاک، N_i مقدار تعلق یافته به هر ویژگی و n تعداد ویژگی‌های موردنظر است.

هریک از شاخص‌ها برای هرکدام از نمونه‌های خاک با استفاده از دو مجموعه TDS و MDS تعیین شدند. در نتیجه برای هر نمونه خاک چهار شاخص کلی کیفیت خاک شامل SQI_{W-TDS} ، SQI_{W-MDS} ، SQI_{IA-TDS} ، SQI_{IA-MDS} به دست آمد.

تحلیل آماری داده‌ها

برای انجام تحلیل‌های آماری از نرم‌افزار SPSS (نسخه ۲۶) استفاده شد. برای مقایسه میانگین ویژگی‌های خاک در کاربری‌های مختلف از تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) استفاده شد و تفاوت میانگین‌ها در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون Duncan ارزیابی گردید. همچنین از Microsoft Excel جهت انجام محاسبات مقدماتی و ترسیم نمودارها و از ArcGIS برای پهنه‌بندی و نمایش مکانی شاخص کیفیت خاک استفاده گردید.

نتایج و بحث

تجزیه و تحلیل آماری ویژگی‌های خاک

خلاصه برخی آماره‌های توصیفی برای خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک کاربری‌های باغ زیتون و بایر در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بین همه ویژگی‌های خاک به جز نسبت میکروبی در دو کاربری بایر و باغ زیتون اختلاف معنی‌داری وجود دارد ($p \leq 0.05$). بررسی مقایسه‌ای ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در دو نوع کاربری بایر و باغ زیتون نشان داد که تغییر کاربری به باغ زیتون تأثیرات مثبت و معناداری بر بهبود کیفیت خاک داشته است. در باغ زیتون، درصد رس، سیلت و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها نسبت به اراضی بایر افزایش یافت، درحالی‌که درصد شن، جرم مخصوص ظاهری و رس قابل‌انتشار در آب کاهش

$$MF_x = \frac{1}{[1 + (\frac{x-b_1}{d})^2]}$$

$$x < b_1$$

$$MF_x = 1 \quad b_1 < x < b_2$$

رابطه (۲)

$$MF_x = \frac{1}{[1 + (\frac{x-b_2}{d})^2]} \quad x > b_2$$

در این رابطه؛

$MF(x)$: تابع عضویت متغیر X

b_1 و b_2 : به ترتیب حدود آستانه پایینی^۱ و حدود آستانه بالایی^۲

d : عرض منطقه انتقالی تابع عضویت را مشخص می‌سازند. در مرحله بعد، وزن‌دهی ویژگی‌ها برای هر یک از مجموعه‌های MDS و TDS انجام شد. در مورد ویژگی‌هایی که در یک مؤلفه همبستگی نداشتند ($r < 0.6$)، وزن هر ویژگی بر اساس نسبت واریانس توضیح داده‌شده به مجموع واریانس تجمعی محاسبه شد. برای ویژگی‌های همبسته ($r > 0.6$)، وزن‌دهی بر اساس میانگین وزنی آن‌ها انجام گرفت (Masto et al., 2008). در مورد مجموعه TDS نیز، وزن ویژگی‌ها با روش تجزیه به عامل‌ها برآورد شد (Shukla and Lal, 2006).

بعد از اینکه وزن ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک تعیین شدند، باید تبدیل به یک شاخص کلی شوند. شاخص‌های کیفیت خاک برای هر نمونه خاک، با استفاده از شاخص تجمعی ساده (SQI_{IA}) (رابطه ۳) و شاخص تجمعی وزن‌دار (SQI_{IW}) (رابطه ۴)، محاسبه شدند (Doran and Parkin, 1994).

رابطه (۳)

$$SQI_{IA} = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{n}$$

در این رابطه N_i نمره تعلق‌گرفته به هر ویژگی و n تعداد ویژگی‌های موردنظر است.

رابطه (۴)

$$SQI_{IW} = \sum_{i=1}^n W_i N_i$$

⁹. Upper Threshold

⁸. Lower Threshold

نشان دادند. با توجه به این که ویژگی‌های فیزیکی اصلی خاک نظیر بافت در مقیاس زمانی کوتاه‌مدت نسبتاً پایداری دارند، این تغییرات را نمی‌توان به‌عنوان دگرگونی بنیادی در ترکیب بافت تفسیر کرد؛ بلکه می‌توان آن‌ها را نتیجه‌ی اثر غیرمستقیم تغییر کاربری دانست. ورود بقایای آلی، افزایش فعالیت زیستی و اقدامات مدیریتی در باغ‌های زیتون (مانند آبیاری و شخم) موجب تجمع ذرات ریز، بهبود تشکیل و پایداری خاکدانه‌ها و کاهش جرم مخصوص ظاهری در لایه سطحی شده است (Joshi and Garkoti, 2023). بنابراین تغییرات مشاهده شده بیانگر بهبود نسبی ساختار خاک و پایداری خاکدانه‌ها در اثر مدیریت و کاربری جدید است، هرچند برای بررسی پایداری بلندمدت این تغییرات و تأثیر آن‌ها بر لایه‌های عمیق‌تر خاک، مطالعات تکمیلی ضروری است. همچنین، افزایش قابل توجه کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل جذب در خاک باغ زیتون بیانگر ارتقاء حاصلخیزی و پتانسیل تغذیه‌ای خاک در این نوع کاربری می‌باشد. این امر را می‌توان به ورود مداوم بقایای گیاهی (برگ، شاخه‌های هرس شده و ریزش میوه)، افزایش فعالیت میکروبی و معدنی‌شدن تدریجی مواد آلی در خاک باغ زیتون نسبت داد که سبب افزایش ذخایر عناصر غذایی می‌شود (Manas and Heras, 2024). افزون بر این، مصرف کودهای آلی و شیمیایی در باغ‌های زیتون یکی از مهم‌ترین عوامل ارتقاء محتوای نیتروژن و عناصر پرمصرف به شمار می‌رود. مقادیر بیشتر عناصر کاتیونی نظیر کلسیم، منیزیم و سدیم نیز می‌تواند ناشی از افزایش ورودی‌های خارجی از طریق آبیاری و کوددهی و همچنین تجمع تدریجی این کاتیون‌ها در لایه سطحی خاک باشد. افزایش قابلیت هدایت الکتریکی در خاک باغ‌های زیتون را می‌توان عمدتاً به مدیریت زراعی نسبت داد. ورود کودهای شیمیایی و آلی سبب افزایش غلظت یون‌های محلول مانند نیترات، پتاسیم، کلسیم و منیزیم در خاک می‌شود. همچنین، آبیاری در شرایط اقلیم نیمه‌خشک منطقه می‌تواند موجب تجمع تدریجی نمک‌ها در لایه سطحی گردد. علاوه بر این، تجزیه بقایای گیاهی زیتون و آزادسازی یون‌های محلول به محیط

خاک نسبت به اراضی بایر ورودی عناصر غذایی بیشتری فراهم می‌کند (Zipori et al., 2020)؛ بنابراین، افزایش EC در این پژوهش بیش از آنکه نشان‌دهنده شوری مضر خاک باشد، بیانگر تأثیر فعالیت‌های مدیریتی و ورودی‌های خارجی بر افزایش غلظت یون‌های غذایی است که در کنار افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، می‌تواند قابلیت نگهداشت و دسترسی عناصر غذایی را در باغ‌های زیتون تقویت نماید. در بخش زیستی، کربن زیست‌توده میکروبی و تنفس میکروبی خاک در باغ زیتون نسبت به اراضی بایر به طور معناداری افزایش داشت که نشان‌دهنده فعالیت میکروبی بالاتر و کیفیت زیستی بهتر خاک است. همچنین، کاهش ضریب متابولیک در باغ زیتون بیانگر بهره‌وری بیشتر میکروارگانیسم‌ها از منابع کربنی و کارایی بالاتر آن‌ها در استفاده از انرژی می‌باشد (Ding, 2023). تنها بین مقادیر نسبت میکروبی در دو کاربری اختلاف معنی‌دار مشاهده نمی‌شود که می‌تواند نشان‌دهنده پایداری نسبی جامعه میکروبی باشد. (Yan et al., 2022). در مجموع، نتایج بیانگر آن است که کاربری باغ زیتون نسبت به اراضی بایر سبب بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک شده و می‌تواند در راستای مدیریت پایدار منابع خاک و ارتقاء بهره‌وری اکوسیستم‌های کشاورزی مؤثر واقع شود.

ویژگی		واحد		کاربری بایر		کاربری باغ زیتون	
				میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار
رس	g/100g	۳۶/۵۰ ^b	۹/۸۴	۳۷/۶۰ ^a	۱۱/۰۹		
سیلت	g/100g	۳۳/۴۳ ^b	۷/۵۰	۳۵/۳۳ ^a	۷/۶۸		
شن	g/100g	۳۰/۰۶ ^a	۱۴/۰۵	۲۷/۰۶ ^b	۱۴/۰۴		
رس قابل انتشار در آب	g/100g	۳۰/۵۶ ^a	۵/۱۶	۲۲/۸۷ ^b	۴/۳۶		
جرم مخصوص ظاهری	g/cm ³	۱/۳۵ ^a	۰/۰۶	۱/۲۸ ^b	۰/۰۸		
میانگین ورنی قطر خاکدانه	mm	۰/۸۸ ^b	۱/۰۵	۳/۲۸ ^a	۱/۹۷		
کربن آلی	g/100g	۰/۴۶ ^b	۰/۱۸	۱/۳۰ ^a	۰/۲۱		
ذخیره کربن	kg/ha	۱۲۵۴۳/۳۳ ^b	۴۷۴۱/۹۶	۳۳۴۵۲ ^a	۶۲۲۷/۸۶		
نیترژن کل	g/100g	۰/۰۷ ^b	۰/۰۳	۰/۲۰ ^a	۰/۰۴		
فسفر قابل جذب	mg/kg	۱۱/۳۱ ^b	۶/۱۳	۱۳/۳۹ ^a	۴/۳۵		
پتاسیم قابل جذب	mg/kg	۱۳/۶۱ ^b	۳۲/۸۹	۱۰۵/۲۶ ^a	۷۱/۶۴		
سدیم	mg/kg	۲۹/۴۷ ^b	۹/۹۱	۳۵/۶۴ ^a	۱۱/۱۰		
کلسیم	mg/kg	۹/۲۱ ^b	۴/۴۴	۲۶/۸۱ ^a	۱۹/۱۶		
منیزیم	mg/kg	۳/۴۳ ^b	۵/۴۹	۱۳/۴۰ ^a	۸/۵۶		
نسبت جذب سدیم	mg/kg	۳/۷۷ ^b	۵/۵۹	۶/۴۷ ^a	۲/۱۰		
کربنات کلسیم معادل	g/100g	۲۲/۰۸ ^b	۶/۸۰	۲۸/۶۲ ^a	۶/۷۱		
اسیدیته	--	۸/۴۲ ^a	۰/۰۸	۸/۳۰ ^b	۰/۱۰		
قابلیت هدایت الکتریکی	dS/m	۲/۴۲ ^b	۱/۰۴	۴/۰۹ ^a	۰/۷۳		
ظرفیت تبادل کاتیونی	cm/kg	۲۸/۲۲ ^b	۴/۶۷	۳۰/۳۳ ^a	۱۰/۰۳		
کربن زیست‌توده میکروبی	mg/100g	۸۹/۷۱ ^b	۴۵/۷۵	۲۵۳/۶۳ ^a	۱۶/۷۵		
تنفس میکروبی	mgCO ₂ .g ⁻¹ dm.24h ⁻¹	۰/۲۸ ^b	۰/۱۴	۰/۵۴ ^a	۰/۱۵		
نسبت میکروبی	g/100g	۱/۹۵ ^a	۱۷/۴	۱/۹۳ ^a	۴/۳۰		
ضریب متابولیک	mgCO ₂ .mgMBC ⁻¹ 24h ⁻¹	۰/۳۲ ^a	۰/۱۳	۰/۲۱ ^b	۰/۰۵		

با استفاده از PCA، در کاربری بایر، شش مؤلفه اول با مقدار ویژه بیشتر از یک محاسبه شد که ۸۹/۵۲٪ از تغییرات داده‌های اصلی را توضیح دادند و می‌توانند برای تعیین MDS استفاده شوند (جدول ۲). هریک از این شش مؤلفه به ترتیب ۳۲/۷۹، ۲۳/۴۷، ۱۲/۸۰، ۱۰، ۵/۸۲ و ۴/۶۹ درصد از واریانس کل را توجیه می‌کنند، درحالی‌که مؤلفه‌های باقی‌مانده واریانس نسبتاً کوچک‌تری دارند و در

توضیح میزان تغییرات مشارکت بسیار کمی دارند. به بیان دیگر، مؤلفه‌های با ارزش ویژه کمتر از ۱، بیانگر توصیف بخش کمتری از واریانس توسط آن مؤلفه نسبت به هریک از متغیرهای مورد مطالعه هستند (Torbert et al., 2008). بردارهای ویژه پس از چرخش واریماکس نشان دادند که در مؤلفه اول رس، شن، جرم مخصوص ظاهری و کربنات کلسیم معادل، در مؤلفه دوم کربن آلی، ذخیره کربن،

نیتروژن کل و کربن زیست‌توده، در مؤلفه سوم رس، منیزیم، قابلیت هدایت الکتریکی و ظرفیت تبادل کاتیونی، در مؤلفه چهارم نسبت جذب سدیم و کلسیم، در مؤلفه پنجم نسبت میکروبی و در مؤلفه ششم میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به‌عنوان ویژگی‌هایی با بالاترین سهم و اختلاف کمتر از ۱۰ درصد بودند. به‌منظور یافتن متغیرهای همبسته در هر مؤلفه از نتایج همبستگی پیرسون (جدول ۳) استفاده شد. نتایج نشان داد در مؤلفه اول بین مقادیر رس و شن و جرم مخصوص ظاهری همبستگی بالایی وجود دارد ($r > 0.6$) بنابراین جرم مخصوص ظاهری با دارا بودن بیشترین وزن به‌عنوان MDS انتخاب گردید. در مؤلفه دوم بین مقادیر کربن آلی، ذخیره کربن، نیتروژن کل و کربن زی‌توده همبستگی معنی‌داری وجود داشت که از میان آن‌ها کربن آلی به‌عنوان MDS انتخاب شد. در مؤلفه سوم بین ظرفیت تبادل کاتیونی و رس همبستگی معنی‌داری وجود داشت که از میان آن‌ها ظرفی تبادل کاتیونی به دلیل داشتن وزن بیشتر انتخاب شد. در مؤلفه چهارم نیز بین نسبت جذب سدیم و کلسیم همبستگی معنی‌داری وجود داشت و از بین آن‌ها نسبت جذب سدیم به‌عنوان MDS در نظر گرفته شد. در نهایت ویژگی‌های جرم مخصوص ظاهری، کربنات کلسیم معادل، کربن آلی، منیزیم، قابلیت هدایت الکتریکی، ظرفیت تبادل کاتیونی، نسبت جذب سدیم و میانگین وزنی خاکدانه‌ها در کاربری بایر به‌عنوان مجموعه MDS در نظر گرفته شدند. در کاربری باغ زیتون نیز با استفاده آنالیز تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (جدول ۲)، پنج مؤلفه اول با ارزش ویژه بزرگ‌تر از ۱، با درصد واریانس تجمعی ۷۸/۲۹٪ استخراج شد. هریک از این پنج مؤلفه به ترتیب ۳۱/۱۶، ۲۳/۳۵، ۹/۸۵، ۷/۵۲ و ۶/۳۹ درصد از واریانس کل را توجیه می‌کنند. در مؤلفه اول ویژگی‌های رس، شن، رس قابل‌انتشار در آب و ظرفیت تبادل کاتیونی دارای بیشترین وزن بودند که به دلیل همبستگی بالای ویژگی‌ها ($r > 0.6$)

(جدول ۴)، درصد رس با دارا بودن بیشترین وزن در مجموعه MDS قرار گرفت. در مؤلفه دوم کربن آلی و تنفس میکروبی دارای بالاترین وزن بودند و به دلیل همبستگی بالا ($r > 0.6$) تنها کربن آلی در مجموعه حداقل قرار گرفت. در مؤلفه سوم فسفر قابل جذب و سدیم شامل ۱۰ درصد بالاترین وزن بودند و با توجه به همبستگی پایین هر دو ویژگی به‌عنوان MDS انتخاب شدند. در مؤلفه‌های چهارم و پنجم نیز به ترتیب ویژگی‌های نسبت جذب سدیم و کربنات کلسیم به‌عنوان MDS انتخاب شدند. در بررسی شاخص کیفیت خاک در منطقه نظرآباد در غرب استان البرز، ویژگی‌های شن، فسفر قابل استفاده، چگالی ظاهری، تخلخل، نسبت جذب سدیم و کربنات کلسیم معادل به‌عنوان MDS انتخاب شدند (میرخانی و همکاران، ۱۳۹۹). در ارزیابی شاخص کیفیت خاک دشت نیشابور، پنج ویژگی قابلیت هدایت الکتریکی، ماده آلی، فسفر قابل استفاده، پتاسیم قابل استفاده و نیتروژن کل به‌عنوان مهم‌ترین ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک معرفی شدند (مقامی مقیم و همکاران، ۱۴۰۱). تقی‌پور و همکاران (۱۴۰۲) در پژوهشی با هدف اثر تغییر کاربری بر کیفیت خاک در منطقه توتکابن استان گیلان چهار ویژگی شامل درصد رس، میانگین وزنی قطر خاکدانه، کربن آلی و فسفر قابل‌دسترس را به‌عنوان حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک انتخاب نمودند. یغماییان و همکاران (۱۳۹۹) در مطالعه‌ای با هدف شناسایی مهم‌ترین ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک و مقایسه شاخص‌های کیفیت خاک به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف و ارتباط آن با عملکرد چای، ویژگی‌های پتاسیم قابل جذب، کربن آلی، pH، فسفر قابل جذب، روی قابل جذب و تعداد نماتد را به‌عنوان MDS معرفی نمودند. بنابراین در مناطق با شرایط اقلیمی و مدیریتی گوناگون، حداقل مجموعه داده‌ها می‌تواند متفاوت باشد.

جدول ۲- تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک در کاربری‌های بایر و زیتون

بایر											زیتون
متغیرها	مؤلفه ۱	مؤلفه ۲	مؤلفه ۳	مؤلفه ۴	مؤلفه ۵	مؤلفه ۶	مؤلفه ۱	مؤلفه ۲	مؤلفه ۳	مؤلفه ۴	مؤلفه ۵
ارزش ویژه	۸/۸۳۵	۶/۳۳۶	۳/۴۵۷	۲/۷۰۳	۱/۵۷۲	۱/۲۶۸	۸/۴۱۴	۶/۳۰۷	۲/۶۶۲	۲/۰۳	۱/۷۲۵
درصد وارپانس	۳۲/۷۲۲	۲۳/۴۶۷	۱۲/۸۰۲	۱۰/۰۱	۵/۸۲۲	۴/۶۹۷	۳۱/۱۶۳	۲۳/۳۵۸	۹/۸۵۸	۷/۵۲	۶/۳۸۸
درصد وارپانس تجمعی	۳۲/۷۲۲	۵۶/۱۸۸	۶۸/۹۹۱	۷۹	۸۴/۸۲	۸۹/۵۱۹	۳۱/۱۶۳	۵۴/۵۲۱	۶۴/۳۷۹	۷۱/۸۹۹	۷۸/۲۸۷
رس	۰/۸۸۱	-۰/۳۷۰	۰/۷۶۳	۰/۲۴۱	-۰/۴۴۰	۰/۲۳۶	-۰/۸۷۷	۰/۲۱۸	۰/۵۷۶	-۰/۱۸۷	-۰/۴۱۸
سیلت	۰/۴۱۹	۰/۳۲۸	-۰/۵۳۹	-۰/۳۵۴	۰/۱۳۰	۰/۴۵۷	-۰/۱۵۰	-۰/۱۳۲	-۰/۳۵۵	-۰/۴۴۸	۰/۱۱۶
شن	-۰/۸۴۱	۰/۳۵۴	-۰/۲۴۱	۰/۳۱۳	-۰/۴۶۳	۰/۲۰۳	۰/۸۱۱	-۰/۳۶۳	-۰/۱۶۹	-۰/۲۰۷	-۰/۴۴۹
رس قابل انتشار در آب	۰/۲۳۰	-۰/۵۶۶	۰/۵۱۲	۰/۳۶۷	-۰/۴۲۳	۰/۱۴۳	-۰/۸۲۸	۰/۴۴۴	۰/۴۴۷	۰/۴۳۲	۰/۲۴۶
جرم مخصوص ظاهری	-۰/۸۹۱	-۰/۵۴۱	۰/۶۶۸	۰/۵۷۸	-۰/۴۵۴	۰/۳۴۹	۰/۷۴۰	۰/۳۶۵	۰/۳۲۲	۰/۲۱۲	-۰/۴۶۰
میانگین ورنی قطر خاکدانه	۰/۴۰۶	۰/۱۴۷	۰/۵۴۹	۰/۱۱۲	۰/۲۳۶	۰/۶۱۸	۰/۵۹۶	۰/۳۹۸	-۰/۱۴۷	-۰/۳۷۷	-۰/۴۷۵
کربن آلی	۰/۵۴۱	۰/۸۸۰	-۰/۴۵۲	-۰/۴۱۲	۰/۲۵۲	-۰/۴۷۸	۰/۵۲۳	۰/۷۹۰	۰/۵۱۷	-۰/۱۱۵	۰/۴۶۲
ذخیره کربن	۰/۴۴۰	۰/۸۲۶	۰/۴۱۵	۰/۴۹۶	۰/۱۳۲	-۰/۴۶۳	۰/۷۱۲	۰/۶۱۴	۰/۱۱۴	-۰/۲۳۶	۰/۲۹۹
نیتروژن کل	۰/۵۵۰	۰/۸۲۱	۰/۵۹۹	-۰/۱۴۱	۰/۱۸۶	-۰/۳۶۲	۰/۶۳۷	۰/۷۴۷	۰/۴۲۴	-۰/۱۱۲	۰/۳۷۸
فسفر قابل جذب	-۰/۶۱۸	-۰/۴۶۳	-۰/۲۵۸	-۰/۲۱۳	۰/۲۴۵	۰/۲۳۵	۰/۴۰۲	۰/۴۱۷	۰/۷۶۲	۰/۳۱۶	۰/۲۶۱
پتاسیم قابل جذب	۰/۳۰۲	۰/۵۱۰	۰/۵۳۰	۰/۲۴۱	-۰/۴۳۹	۰/۳۱۰	۰/۵۳۹	۰/۵۶۸	۰/۵۱۷	۰/۳۸۸	۰/۴۰۳
سدیم	-۰/۲۶۸	۰/۳۷۰	-۰/۲۶۱	-۰/۶۰۰	۰/۴۳۷	۰/۲۲۸	۰/۳۹	۰/۳۲۵	-۰/۷۲۵	۰/۴۲۹	۰/۲۵۱
کلسیم	۰/۲۳۴	۰/۳۳۴	-۰/۱۷۰	۰/۸۰	۰/۱۵۹	۰/۲۳۶	۰/۵۳۱	۰/۴۶۰	۰/۵۶۵	۰/۴۶۶	۰/۵۳۷
منیزیم	۰/۲۵۶	-۰/۲۸۹	۰/۸۱۸	۰/۳۷۲	۰/۱۷۴	-۰/۲۹۳	۰/۴۴۷	۰/۴۴۵	-۰/۶۵۵	۰/۳۵۹	-۰/۴۸۹
نسبت جذب سدیم	۰/۲۲۳	-۰/۴۵۲	-۰/۲۳۷	۰/۸۴۰	۰/۳۵۹	۰/۳۱۵	۰/۳۵۴	-۰/۲۸۳	-۰/۵۰۸	۰/۶۲۷	۰/۳۶۷
کربنات کلسیم معادل	۰/۸۷۲	-۰/۷۴۷	-۰/۱۰۳	۰/۱۱۴	۰/۱۵۵	-۰/۱۵۲	-۰/۱۴۴	-۰/۳۱۱	۰/۴۳۵	-۰/۴۹۲	۰/۶۸۴
اسیدیته	۰/۲۵۲	-۰/۲۷۶	-۰/۴۲۳	-۰/۴۹۶	-۰/۳۴۷	۰/۳۴۸	-۰/۴۱۵	۰/۳۳۲	۰/۵۶۶	۰/۴۹۸	۰/۳۳۶
قابلیت هدایت الکتریکی	۰/۲۶۳	۰/۴۳۱	۰/۷۹۸	۰/۰۶۳	۰/۳۶۰	۰/۲۶۰	۰/۳۸۷	۰/۶۴۹	-۰/۱۶۸	-۰/۱۱۴	-۰/۳۹۲
ظرفیت تبادل کاتیونی	۰/۲۴۷	-۰/۳۹۷	۰/۸۴۰	۰/۱۸۳	۰/۱۰۲	۰/۲۴۵	-۰/۸۵۶	۰/۳۶۲	۰/۴۵۸	-۰/۱۳۵	-۰/۳۶۹
کربن زیست‌توده میکروبی	۰/۵۰۱	۰/۸۳۰	-۰/۴۷۸	-۰/۲۳۵	۰/۱۰۶	-۰/۳۵۶	۰/۶۰۵	۰/۴۹۱	-۰/۳۲۲	۰/۵۹۸	۰/۲۳۶
تنفس میکروبی	۰/۶۲۹	۰/۷۶۵	-۰/۳۱۲	-۰/۱۳۵	۰/۱۶۳	۰/۳۲۶	۰/۳۱۲	۰/۸۶۱	-۰/۲۴۳	۰/۴۷۸	-۰/۴۱۷
نسبت میکروبی	۰/۲۷۸	۰/۳۷۳	۰/۴۶۰	-۰/۱۸۰	۰/۶۷۶	-۰/۴۱۲	-۰/۶۳۷	-۰/۶۰۳	-۰/۱۴۵	۰/۴۵۶	۰/۳۵۹
ضریب متابولیک	۰/۷۶۱	۰/۳۰۶	-۰/۴۳۶	۰/۶۷۰	-۰/۳۹۲	۰/۱۱۲	۰/۵۶۴	۰/۶۴۲	۰/۵۳۶	۰/۱۳۶	-۰/۲۵۴

اعداد برجسته به عنوان بیشترین وزن در نظر گرفته شدند و اعدادی که زیر آن‌ها خط کشیده شده است به عنوان MDS انتخاب شده‌اند. اعداد برجسته و ایتالیک مؤلفه‌های انتخاب‌شده را نشان می‌دهند.

جدول ۳- ضرایب همبستگی برای مؤلفه‌هایی با بیشترین وزن در کاربری بایر

Properties	Clay رس	Sand ماسه	BD چگالی ظاهری	OC کربن آلی	N نیترژن	Caco ₃ کربنات کلسیم	EC هدایت الکتریکی	Ca کلسیم	Mg منیزیم	SAR نسبت سدیم قابل تعویض	CEC ظرفیت تبادل کاتیونی	CS اشباع
Clay	۱											
Sand	-۰/۸۶*	۱										
BD	-۰/۸۵*	۰/۹۰*	۱									
OC	۰/۱۵	-۰/۱۷	-۰/۲۴	۱								
N	۰/۱۷	-۰/۲۰	-۰/۲۵	۰/۹۹*	۱							
Caco ₃	-۰/۰۴	۰/۱۰	-۰/۰۶	-۰/۷۶*	-۰/۷۷*	۱						
EC	۰/۲۸	-۰/۰۲	-۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۱۲	-۰/۰۱	۱					
Ca	۰/۰۶	۰/۰۴	-۰/۱۴	۰/۳۹	۰/۳۸	-۰/۰۵	۰/۱۱	۱				
Mg	۰/۰۶	۰/۱۲	۰/۲۳	-۰/۲۹	-۰/۲۷	۰/۰۵	۰/۴۶	-۰/۳۵	۱			
SAR	-۰/۲۹	۰/۳۳	۰/۰۳	۰/۱۱	-۰/۱۵	۰/۳۸	-۰/۱۰	۰/۵۸	-۰/۴۸	۱		
CEC	۰/۲۶	۰/۱۷	۰/۲۵	۰/۳۲	-۰/۳۱	۰/۱۱	۰/۴۹	-۰/۲۹	۰/۹۹*	-۰/۳۶	۱	
CS	۰/۰۴	-۰/۰۶	-۰/۱۱	۰/۹۹*	۰/۹۸*	-۰/۷۹*	۰/۱۲	۰/۳۸	-۰/۲۵	-۰/۱۱	-۰/۲۹	۱

* نشان‌دهنده‌ی تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ است.

جدول ۴- ضرایب همبستگی برای مؤلفه‌هایی با بیشترین وزن در کاربری باغ زیتون

Properties	Clay رس	Sand ماسه	OC کربن آلی	P فسفر	Na سدیم	CEC ظرفیت تبادل کاتیونی	WDC محتوای آب قابل استفاده	BR مقاومت خاک
Clay	۱							
Sand	-۰/۸۳*	۱						
OC	-۰/۱۸	۰/۱۱	۱					
P	-۰/۳۳	۰/۵۱	۰/۲۷	۱				
Na	-۰/۱۶	۰/۱۹	۰/۱۶	-۰/۲۴	۱			
CEC	۰/۹۹*	۰/۸۴*	-۰/۱۱	-۰/۳۵	-۰/۱۴	۱		
WDC	۰/۸۸*	-۰/۸۳*	-۰/۰۱	-۰/۲۴	-۰/۳۳	۰/۸۹*	۱	
BR	۰/۰۱	-۰/۰۸	۰/۸۶*	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۱۳	۱

* نشان‌دهنده‌ی تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ است.

MDS به دست آمد (جدول ۵). به این ترتیب شاخص‌های تجمعی ساده و وزن‌دار کیفیت خاک برای مؤثر TDS و مؤثر MDS محاسبه شدند.

در مرحله بعد تمامی ویژگی‌های خاک برای هر دو کاربری با استفاده از توابع عضویت فازی بین مقادیر صفر تا یک امتیازدهی شدند و وزن مجموعه‌های TDS و

جدول ۵- وزن ویژگی‌های خاک در مجموعه TDS و MDS برای کاربری‌های مختلف

ویژگی	بایر			باغ زیتون		
	TDS weight	MDS weight	COM	TDS weight	MDS weight	COM
رس	۰/۹۷۶	۰/۰۴۰		۰/۰۴۵	۰/۰۳۷	
سیلت	۰/۸۹۳	۰/۰۳۷		۰/۰۴۲		
شن	۰/۹۶۸	۰/۰۴۰		۰/۰۴۵		
رس قابل‌انتشار در آب	۰/۹۶۶	۰/۰۴۰		۰/۰۴۳		
جرم مخصوص ظاهری	۰/۹۲۸	۰/۰۳۸	۰/۲۶	۰/۰۳۸		
میانگین ورنی قطر خاکدانه	۰/۶۹۸	۰/۰۲۹	۰/۱۴	۰/۰۲۴		
کربن آلی	۰/۹۸۲	۰/۰۴۱	۰/۱۱	۰/۰۴۴	۰/۱۱۵	
ذخیره کربن	۰/۹۷۲	۰/۰۴۰		۰/۰۴۴		
نیترژن کل	۰/۹۸۵	۰/۰۴۱		۰/۰۴۵		
فسفر قابل جذب	۰/۶۶۸	۰/۰۲۸		۰/۰۴۰	۰/۰۴	
پتاسیم قابل جذب	۰/۸۷۱	۰/۰۳۶		۰/۰۳۸		
سدیم	۰/۷۶۸	۰/۰۳۲		۰/۰۴۳	۰/۰۴	
کلسیم	۰/۸۲۹	۰/۰۳۴		۰/۰۴۰		
منیزیم	۰/۹۶۹	۰/۰۴۰	۰/۰۵	۰/۰۳۷		
نسبت جذب سدیم	۰/۹۳۶	۰/۰۳۹	۰/۰۳	۰/۰۴۰	۰/۰۲	
کربنات کلسیم معادل	۰/۸۱۷	۰/۰۳۴		۰/۰۳۹	۰/۲۲	
اسیدیته	۰/۶۳۴	۰/۰۲۶		۰/۰۲۶		
قابلیت هدایت الکتریکی	۰/۸۶۵	۰/۰۳۶	۰/۰۵	۰/۰۳۹		
ظرفیت تبادل کاتیونی	۰/۹۵۹	۰/۰۴۰	۰/۰۵	۰/۰۴۶		
کربن زیست‌توده میکروبی	۰/۹۷۰	۰/۰۴۰		۰/۰۳۶		
تنفس میکروبی	۰/۹۹۶	۰/۰۴۱		۰/۰۴۳		
نسبت میکروبی	۰/۹۰۹	۰/۰۳۸	۰/۰۱۸	۰/۰۴۲		
ضریب متابولیک	۰/۸۸۸	۰/۰۳۷		۰/۰۳۸		

COM: سهم هر ویژگی Weight: وزن هر ویژگی

مقایسه میانگین شاخص‌های کیفیت خاک بین دو نوع کاربری زمین، یعنی اراضی بایر و باغ زیتون (جدول ۶)، نشان می‌دهد که کیفیت خاک در زمین‌های دایر به‌طور معنی‌داری بالاتر است ($p \leq 0.05$). در تمامی حالت‌ها، اعم از نوع داده (MDS یا TDS) و روش محاسبه (ساده یا وزنی)، مقادیر SQI در کاربری باغ زیتون بیشتر از کاربری بایر بوده است، به‌طوری که این افزایش بین ۱/۶ تا ۱/۹ برابر گزارش شده است. این تفاوت را می‌توان به تأثیر مدیریت کشاورزی نسبت داد، چراکه در باغ‌های زیتون، فعالیت‌هایی نظیر افزودن مواد آلی، آبیاری، کنترل فرسایش و حفظ پوشش گیاهی فعال صورت می‌گیرد که به بهبود ساختار خاک، افزایش تنوع زیستی خاک و پایداری

شیمیایی آن (مانند ثبات pH، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و حفظ عناصر غذایی) منجر می‌شود. در مقابل، خاک‌های بدون استفاده یا رها شده معمولاً دچار فشردگی، کاهش ماده آلی و افت میکروارگانیسم‌های مفید می‌شوند که این عوامل در مجموع باعث کاهش کیفیت خاک می‌گردند. این نتایج با مطالعات مختلف جهانی، از جمله پژوهش لی و همکاران (۲۰۲۱) و اوتاوا و همکاران (۲۰۲۴) در مناطق نیمه‌خشک، هم‌راستا بوده و بر اهمیت کاربرد مدیریت پایدار زمین تأکید دارند. در راستای تأیید این نتایج مشاهده شد تقی‌پور و همکاران (۱۴۰۲) در نتیجه پژوهشی با هدف اثر تغییر کاربری بر کیفیت خاک در منطقه توتکابن استان گیلان به این نتیجه دست یافتند که کیفیت خاک در کاربری گندم

دیم به‌طور معنی‌داری بیشتر از کاربری مرتع است. آن‌ها اعلام نمودند شاخص کیفیت خاک بیشتر در کاربری دیم نسبت به مرتع به دلیل حضور مقادیر بیشتر کربن آلی و همچنین استفاده از کودها و وجود بقایای گیاهی در سطح زمین در کاربری دیم در مقایسه با مرتع است. همچنین، مطالعه‌ای توسط چن و همکاران (۲۰۲۳) که اثرات بلندمدت تغییرات کاربری زمین بر ویژگی‌های خاک را در مناطق مختلف جهان بررسی کرده بود، نشان داد که تبدیل زمین بایر به باغ‌های زراعی 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 و به‌طور کلی افزایش کیفیت خاک می‌گردد. وانگ و همکاران (۲۰۲۳) نیز در نتیجه تحقیق خود بر روی اثر تغییرات کاربری بر ذخیره کربن و سایر ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک اعلام کردند هر گونه تلاش برای کاهش تلفات SOC 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.

علاوه بر کاربری زمین، نوع روش محاسبه کیفیت خاک نیز در نتایج تفاوت ایجاد کرده است. به‌طور کلی، روش وزنی مقادیر پایین‌تری نسبت به روش ساده ارائه داده است (جدول ۶) هرچند این اختلاف‌ها از نظر آماری معنی‌دار نبودند. دلیل اصلی این اختلاف در آن است که روش وزنی به هریک از شاخص‌های اندازه‌گیری شده وزن متفاوتی اختصاص می‌دهد که منعکس‌کننده اهمیت نسبی آن شاخص در عملکرد و سلامت خاک است و سبب دقت بالاتر در ارزیابی می‌شود. در حالی که در روش ساده، تمامی شاخص‌ها با وزن برابر لحاظ می‌شوند و این موضوع می‌تواند منجر به ساده‌سازی بیش از حد ساختار اکولوژیکی خاک شود (Karlen te al., 2001). در واقع، نتایج پژوهش

حاضر و شواهد موجود در مطالعات پیشین نشان می‌دهند که روش وزنی به‌طور گسترده‌تری مورد استفاده قرار گرفته و در بسیاری از تحقیقات به‌عنوان روش ارجح برای ارزیابی کیفیت خاک معرفی شده است (Karlen te al., 2001; Ibno Namr et al., 2023). چروبین و همکاران (۲۰۱۶) عنوان کرده‌اند اگرچه مقدار شاخص کیفیت ساده و وزنی از نظر آماری مشابه هستند؛ اما توصیه می‌شود به‌ویژه هنگامی که تعداد شاخص‌های شیمیایی، فیزیکی و زیستی نامتعادل است، از شاخص‌های وزنی استفاده شود. ابنونمر و همکاران (۲۰۲۳)، در مقایسه سه روش تعیین شاخص کیفیت خاک نشان دادند که شاخص‌های وزن‌دار در مقایسه با شاخص ساده کیفیت خاک به دلیل اختصاص وزن مناسب برای ویژگی‌های خاک کارآمدتر هستند. واعظی و همکاران (۱۳۹۹) شاخص‌های کیفیت تجمعی وزنی، ساده و شاخص کیفیت نمورو را با استفاده از کل ویژگی‌ها و حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک تعیین کردند. نتایج نشان داد شاخص کیفیت خاک وزنی حاصل از حداقل ویژگی‌ها - های مؤثر بر کیفیت خاک بر اساس آماره $R^2=0.92$ ، دقت بیشتری نسبت به سایر شاخص‌های کیفیت خاک داشت. همتی و همکاران (۱۳۹۸) نیز در نتیجه تحقیق خود بر روی ارزیابی کیفیت خاک اراضی شالیزاری بیان نمودند که استفاده از مدل وزن‌دار شاخص کیفیت خاک و حداقل خصوصیات مؤثر بر کیفیت خاک بهتر توانسته است تغییرات عملکرد در رابطه با کیفیت خاک را توجیه نماید.

در کنار روش محاسبه، تفاوت بین مجموعه داده‌های استفاده‌شده نیز قابل توجه است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از داده‌های حداقلی به‌طور میانگین مقادیر کمی بالاتری برای شاخص کیفیت خاک نسبت به مجموعه کل داده‌ها به همراه دارد. با این حال، اختلاف میان این دو چندان زیاد نیست که نشان‌دهنده کارایی بالای مجموعه شاخص‌های منتخب در MDS است. روش MDS که معمولاً از طریق تحلیل آماری مانند تحلیل مؤلفه‌های اصلی تعیین می‌شود، قادر است با استفاده از تعداد کمتری از متغیرهای کلیدی، تصویری نزدیک به واقعیت از کیفیت

خاک ارائه دهد. این امر به‌ویژه در شرایطی که منابع محدود هستند، زمان بررسی کم است یا در پروژه‌های پایش وسیع خاک، از اهمیت زیادی برخوردار است. کارایی بالاتر استفاده از مجموعه داده‌های حداقلی در مطالعات اندروز و همکاران (۲۰۰۴)، شوئیت و همکاران (۲۰۲۵)، یننه و همکاران (۲۰۲۴)، ملکی و همکاران (۲۰۲۲) و سایر پژوهش‌های نوین تأیید شده و جایگاه علمی آن به‌عنوان ابزاری کاربردی در ارزیابی سلامت خاک تثبیت شده است. در همه این پژوهش‌ها این نتیجه اعلام شده است که به طور

معمول استفاده از مجموعه کل داده‌ها منجر به بهبود ارزیابی جامع کیفیت خاک و افزایش دقت ارزیابی‌ها می‌شود؛ اما تجزیه و تحلیل‌های پیچیده با توجه به تعداد زیادی از ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک، پرمهت، پرهزینه و وقتگیر هستند؛ بنابراین در نظر گرفتن تعداد محدودتری از نشانگرهای خاک که نماینده بهتری از کیفیت خاک باشند، به‌عنوان MDS توصیه شده است.

جدول ۶- مقایسه میانگین شاخص‌های کیفیت خاک در کاربری‌های مختلف

شاخص کیفیت خاک	نوع داده	کاربری بایر	کاربری باغ زیتون
SQI _A	TDS	۰/۴۴ ^b	۰/۷۶ ^a
	MDS	۰/۴۸ ^b	۰/۷۹ ^a
SQI _w	TDS	۰/۴۱ ^b	۰/۷۵ ^a
	MDS	۰/۴۷ ^b	۰/۷۷ ^a

کلاس‌بندی کیفیت خاک

شاخص‌های کیفیت خاک مطابق طبقه‌بندی کیفیت خاک به روش کی و همکاران (۲۰۰۹) (جدول ۷) که SQI را در دامنه صفر تا ۱ نمره‌دهی می‌کند و معمولاً به

چهار کلاس کلی تقسیم می‌شود (کلاس I: عالی، کلاس II: خوب، کلاس III: متوسط و کلاس IV: ضعیف) طبقه‌بندی شدند. نقشه توزیع مکانی شاخص‌های کیفیت خاک در شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۷- درجه‌بندی کیفیت خاک در دو روش TDS و MDS

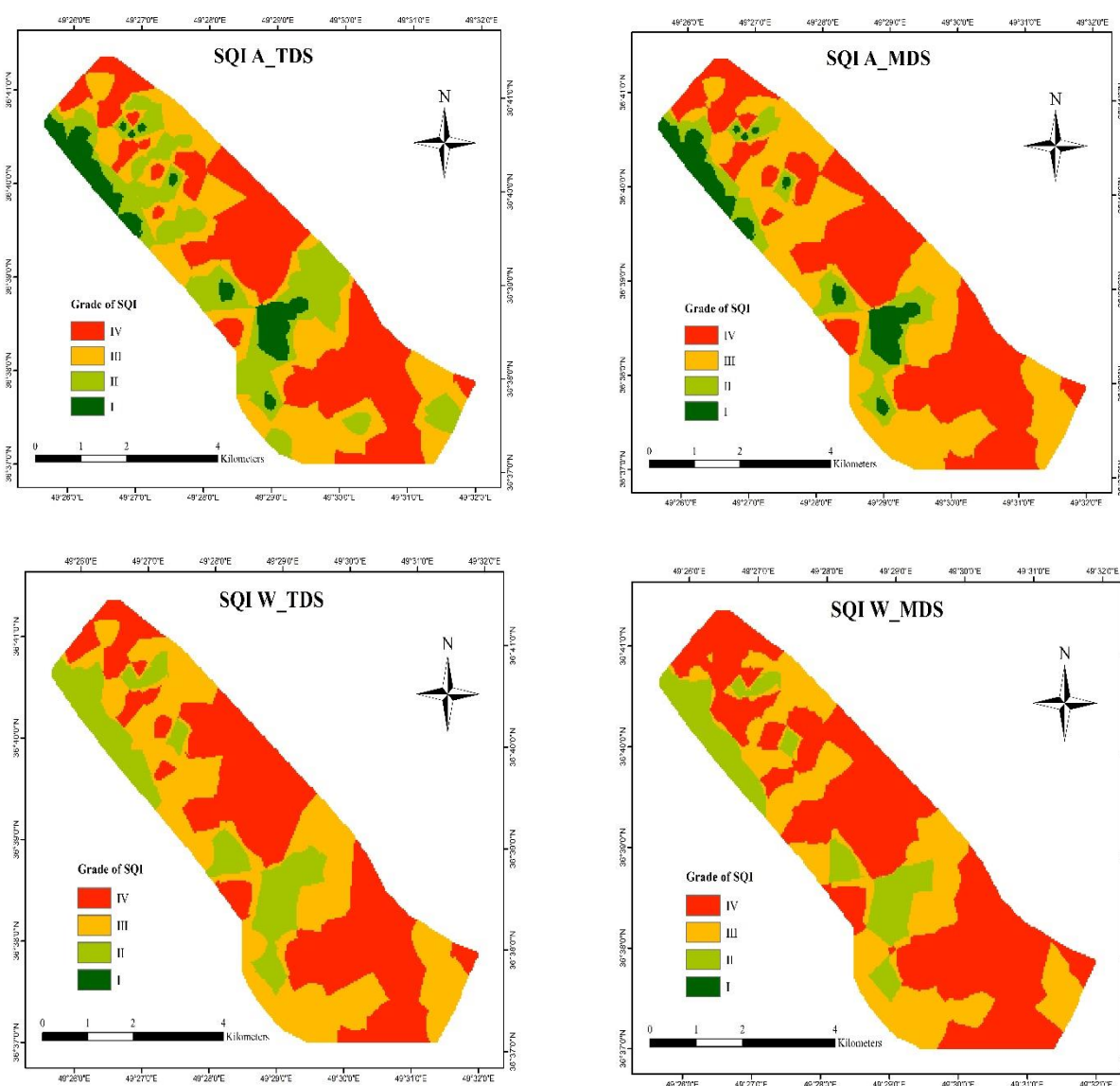
SQI Model	Indicator Method	SQI Grade			
		I	II	III	IV
IQI	TDS	$IQI_{TDS} > 0.76$	$0.76 > IQI_{TDS} > 0.66$	$0.66 > IQI_{TDS} > 0.56$	$0.56 > IQI_{TDS}$
	MDS	$IQI_{MDS} > 0.78$	$0.78 > IQI_{MDS} > 0.68$	$0.68 > IQI_{MDS} > 0.58$	$0.58 > IQI_{MDS}$

نتایج حاصل از تحلیل نقشه‌های شاخص کیفیت خاک با استفاده از مدل‌های مختلف نشان می‌دهد همه مدل‌ها توانسته‌اند به‌خوبی اثر کاربری بر کیفیت خاک را نشان دهند و کیفیت خاک در منطقه به‌طور محسوسی تحت تأثیر نوع کاربری زمین قرار دارد (شکل ۲). همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نواحی با کاربری بایر، مناطق شهری، مناطق کوهستانی و دارای شیب زیاد، کیفیت خاک در پایین‌ترین

سطح (کلاس IV) قرار دارد. این کاهش کیفیت می‌تواند ناشی از فرسایش، کاهش مواد آلی، فشردگی خاک و افزایش نمک‌های محلول باشد؛ عواملی که در مطالعات مشابه نیز به‌عنوان مؤلفه‌های مخرب اصلی در تخریب کیفیت خاک معرفی شده‌اند (Xiong et al., 2024; Geremew et al., 2023). در مقابل، باغ‌های زیتون و اراضی با پوشش گیاهی پایدار عمدتاً در کلاس II و I قرار

پایداری بیشتر و پوشش گیاهی دائمی پیش می‌رود، شاخص کیفیت خاک نیز بهبود می‌یابد و برعکس، تخریب پوشش گیاهی و بهره‌برداری بی‌رویه موجب کاهش چشمگیر کیفیت خاک می‌شود. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که پوشش گیاهی پایدار با بهبود ساختار خاک، افزایش فعالیت میکروبی و کنترل فرسایش، نقش مؤثری در حفظ سلامت خاک ایفا می‌کند (Zipori et al., 2020).

دارند که نشان‌دهنده تأثیر مدیریت پایدار زمین و اثر حفاظتی پوشش گیاهی بر حفظ و ارتقای کیفیت خاک است. همچنین، باغ‌های زیتون احداث‌شده در شیب‌های زیاد و مناطق دارای پوشش گیاهی طبیعی نیمه بیابانی که در آن‌ها هنوز تا حدودی ویژگی‌های کیفی خاک حفظ‌شده است، دارای کیفیت متوسط تا نیمه پایدار هستند. به‌طور کلی، نقشه بیانگر آن است که هرچه کاربری زمین به سمت



شکل ۲- پهنه‌بندی شاخص‌های کیفیت خاک منطقه با استفاده از روش‌های مختلف

بررسی مساحت‌های مربوط به هریک از کلاس-

های کیفیت خاک نشان داد که در روش SQIA-TDS، حدود

۲۲۶/۶۳ هکتار از منطقه در کلاس کیفیت بسیار خوب

(کلاس I) قرار دارد (جدول ۸). این مقدار در روش SQIA-

پهنه‌بندی شاخص‌های کیفیت خاک در کاربری-

های مختلف

وزن‌دهی متغیرها و حساسیت روش‌ها ایجاد شده است. ولی الگوی کلی پراکنش کلاس‌ها در همه روش‌ها هماهنگ و منطقی باقی‌مانده است.

در مجموع، نتایج نشان داد که بخش قابل توجهی از اراضی منطقه مورد مطالعه در کلاس‌های متوسط تا ضعیف کیفیت خاک (III و IV) قرار دارند و تنها اراضی تحت کشت زیتون در مناطق کم‌شیب و پایین‌دست در کلاس‌های I و II جای گرفتند (شکل ۲). همچنین مقایسه روش‌های مختلف محاسبه شاخص کیفیت خاک بیانگر آن بود که استفاده از TDS ارزیابی سخت‌گیرانه‌تری ارائه می‌دهد و اراضی بیشتری را در کلاس‌های پایین‌تر قرار می‌دهد، در حالی که روش‌های مبتنی بر استفاده از MDS با وجود استفاده از تعداد شاخص کمتر، توانستند الگوی توزیع کیفیت خاک را با دقت قابل قبول بازنمایی کنند. این یافته‌ها نشان‌دهنده کارایی بالای روش MDS به عنوان جایگزینی اقتصادی و قابل اعتماد برای پایش کیفیت خاک در مقیاس‌های وسیع است؛ موضوعی که پیش‌تر نیز در مطالعات که پیش‌تر نیز توسط اندروز و همکاران (۲۰۰۴) و رحمانپور و همکاران (۲۰۱۴) تأیید شده است.

MDS کمی کمتر و برابر با ۲۱۷/۰۲ هکتار بود. در سطوح پایین‌تر کیفیت، مساحت اراضی افزایش یافته است؛ به‌طوری‌که در کلاس II، مساحت اراضی به ترتیب برای روش‌های SQIA-MDS و SQIA-TDS برابر با ۲۸۷/۵۶ و ۶۸۱/۱۷ هکتار برآورد شد. این روند در کلاس‌های III و IV نیز ادامه داشت و بیشترین مساحت‌ها در کلاس‌های پایین‌تر کیفیت متمرکز شدند. برای نمونه، روش SQIA-MDS کلاس III را با ۱۱۷۵/۶۵ هکتار و کلاس IV را با ۱۲۶۶/۸۵ هکتار شناسایی کرده است. در روش‌های تجمعی وزنی نیز الگوی مشابهی مشاهده شد. در روش SQIW-TDS، کلاس I مشاهده نشد و کلاس II برابر ۴۸۵/۹۶ هکتار بود که حاکی از آن است که هیچ بخشی از منطقه با کیفیت بسیار خوب شناسایی نشده و بیشتر اراضی در طبقات پایین‌تر کیفیت قرار گرفته‌اند. همین روش کلاس III را با ۱۱۷۱/۵۱ هکتار و کلاس IV را با ۱۲۸۹/۶۵ هکتار شناسایی کرده است. همچنین، در روش SQIW-MDS نیز کلاس I مشاهده نشد، اما با افزایش کلاس کیفیت، به ترتیب مساحت‌ها افزایش یافت و کلاس IV با ۱۵۸۰/۴۸ هکتار بیشترین سطح را به خود اختصاص داد. این نتایج نشان می‌دهد که در روش‌های مختلف محاسبه شاخص کیفیت خاک، الگوی کلی پراکنش کلاس‌ها مشابه است؛ به‌طوری‌که بیشترین مساحت‌ها در کلاس‌های پایین‌تر کیفیت متمرکز شده‌اند و کلاس‌های با کیفیت بسیار خوب (کلاس I) بخش کوچکی از منطقه را تشکیل می‌دهند یا در برخی روش‌های وزنی مشاهده نمی‌شوند. با این حال، مقادیر دقیق مساحت هر کلاس بین روش‌ها تفاوت دارد. این تفاوت‌ها عمدتاً ناشی از ماهیت محاسباتی و وزن‌دهی شاخص‌ها در هر روش است؛ برای مثال، در روش‌های تجمعی وزنی، اهمیت بیشتر به شاخص‌های کلیدی داده شده است و بنابراین ممکن است بخشی از اراضی به کلاس‌های پایین‌تر تنزل پیدا کند، در حالی که در روش‌های ساده کلاس‌بندی بر اساس میانگین شاخص‌ها است و بخشی از اراضی در کلاس‌های بالاتر قرار می‌گیرند. به عبارت دیگر، تفاوت‌های جزئی در مساحت‌ها به دلیل نحوه محاسبه شاخص ترکیبی،

جدول ۸ - مساحت کلاس های کیفیت خاک با استفاده از روش های مختلف (هکتار)

GRADE	SQI _A -TDS	SQI _A -MDS	SQI _W -TDS	SQI _W -MDS
I	۲۲۶/۶۳	۲۱۷/۰۲	*	*
II	۶۸۱/۱۷	۲۸۷/۵۶	۴۸۵/۹۶	۴۱۳/۱۳
III	۹۳۶/۶۷	۱۱۷۵/۶۵	۱۱۷۱/۵۱	۹۵۲/۹۱
IV	۱۱۰۲/۳۷	۱۲۶۶/۸۵	۱۲۸۹/۶۵	۱۵۸۰/۴۸

نتیجه گیری کلی

نتایج این مطالعه به روشنی نشان داد که تغییر کاربری اراضی از وضعیت بایر با پوشش طبیعی نیمه بیابانی به باغ های زیتون، بهبود چشمگیری در کیفیت خاک منطقه لوشان، یکی از قطب های زیتون کاری ایران را به همراه دارد. ارتقاء ویژگی هایی نظیر افزایش کربن آلی، نیتروژن، ظرفیت تبادل کاتیونی، تنفس میکروبی و کاهش ضریب متابولیک در خاک باغ های زیتون نسبت به اراضی بایر، حاکی از ارتقاء کارایی زیستی و حاصلخیزی خاک است. در بُعد روشی شناسی، مقایسه دو مدل محاسبه شاخص کیفیت خاک، یعنی مدل تجمعی ساده (SQI_A) و مدل تجمعی وزنی (SQI_W)، نشان داد که مدل وزنی با لحاظ کردن

اهمیت نسبی هر ویژگی، ارزیابی دقیق تری از وضعیت عملکرد خاک ارائه می دهد. همچنین، تحلیل مؤلفه های اصلی (PCA) در انتخاب مؤثرترین ویژگی های خاک برای تشکیل مجموعه داده های حداقلی (MDS) موفق عمل کرده و با کاهش تعداد متغیرها، کارایی زمانی و اقتصادی ارزیابی کیفیت خاک را بهبود بخشید؛ بدون آنکه دقت نتایج به طور معنی داری کاهش یابد؛ بنابراین، ترکیب MDS و SQI_W به عنوان یک چارچوب تحلیلی مؤثر برای پایش سلامت خاک در مقیاس منطقه ای پیشنهاد می شود. نتایج تأکید دارند که بهره برداری پایدار از اراضی، همراه با انتخاب مناسب نوع کاربری و مدیریت صحیح آن، نقش کلیدی در حفظ و ارتقاء عملکرد خاک و امنیت غذایی در مناطق خشک و نیمه خشک خواهد داشت.

فهرست منابع

۱. تقی پور، م.، یغمائیان مهابادی، ن. و شعبانپور، م. (۱۴۰۲). ارزیابی شاخص های کیفیت خاک با استفاده از تحلیل های چند متغیره در کاربری های مختلف اراضی (مطالعه موردی: توتکابن استان گیلان). مهندسی زراعی. ۴۶ (۳). ۲۵۱-۲۷۱.
۲. حیدری، ن.، موسوی، س.ب.، بهشتی آل آقا، ع.، رخس، ف. و کریمی، ا. (۱۴۰۱). تأثیر تغییر کاربری اراضی بر برخی ویژگی های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک. تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۳ (۷)، ۱۶۲۵-۱۶۴۳.
۳. عاکف، م.، و رحیمی لاکه، هادی. ۱۳۸۶، ارزیابی کیفی تناسب اراضی برای محصول زیتون در بخشی از اراضی شهرستان رودبار (استان گیلان)، دهمین کنگره علوم خاک ایران، کرج.
۴. مقامی مقیم، ف.، کریمی، ع.، باقری بداغ آبادی، م.، و امامی، ح. (۱۴۰۱). ارزیابی نقش سامانه های مدیریتی مختلف بر شاخص کیفیت خاک با استفاده از عملکرد محصول (مطالعه موردی: دشت نیشابور). آب و خاک. ۳۶ (۱). ۹۵-۱۱۲.
۵. مولائی آرپناهی، م.، صالحی، م.، کریمیان اقبال، م.، و مصلح، ز. (۱۳۹۹). تأثیر تغییر کاربری اراضی بر برخی از شاخص های فیزیکی و شیمیایی کیفیت خاک، منطقه بازفت، (استان چهارمحال و بختیاری). آب و خاک. ۳۴ (۳). ۷۰۷-۷۲۰.

۶. میرخانی، ر.، واعظی، ع.، و رضائی، ح. (۱۳۹۹). بررسی شاخص‌های کیفیت خاک در کشتزارهای گندم آبی در منطقه نظرآباد در غرب استان البرز. آب و خاک. ۳۴(۵): ۱۱۲۵-۱۱۳۹.
۷. میرخانی، ر.، بایبوردی، ا.، سعادت، س.، اسمعیل‌نژاد، ل.، و رضایی، ح. (۱۴۰۲). ارزیابی کیفیت خاک اراضی تحت کشت گندم آبی در دشت تبریز، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۴ (۱۲): ۱۹۸۱-۱۹۹۴.
۸. همتی، س.، یغمائیان مهابادی، ن.، فرهنگی، م.، و صبوری، ع. (۱۳۹۸). ارزیابی شاخص‌های کیفیت خاک و ارتباط آن با عملکرد برنج در شالیزارهای مرکزی استان گیلان. مجله مدیریت خاک و تولید پایدار. ۹ (۱): ۱۳۵-۱۵۰.
۹. یغمائیان مهابادی، ن.، فیاض، ح.، صبوری، ع.، و شیرین فکر، ا. (۱۳۹۹). مقایسه روش‌های ارزیابی کیفیت خاک و ارتباط آن با عملکرد در اراضی چایکاری غرب استان گیلان. پژوهش‌های خاک. ۳۴ (۴): ۴۳۵-۴۵۰.
10. Anderson TH, Domsch KH (2010) Soil microbial biomass: the eco-physiological approach. *Soil Biol and Biochem* 42 (12): 2039-2043. doi: 10.1016/j.soilbio.2010.06.026.
11. Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Cambardella, C. A. (2004). The soil management assessment framework: a quantitative soil quality evaluation method. *Soil Science Society of America Journal*, 68(6), 1945-1962.
12. Bandyopadhyay, S., & Maiti, S. K. (2021). Different soil factors influencing dehydrogenase activity in mine degraded lands—state-of-art review. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232(9), 360.
13. Beck T, Joergensen RG, Kandeler E, Makeschin F, Nuss E, Oberholzer HR, Scheu S (1997) An inter-laboratory comparison of ten different ways of measuring soil microbial biomass C. *Soil Biol and Biochem* 29 (7):1023-1032. doi: 10.1016/S0038-0717(97)00030-8.
14. Blake G.R, Hartage K.H (1986) Bulk density. In: Klute, A. (Ed.), *Method of Soil Analysis, Part I. Physical and Mineralogical Methods: Agronomy Monograph no. 9, second ed.*, pp. 363–375.
15. Bower, C. A., Reitemeier, R. F., & Fireman, M. (1952). Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. *Soil science*. 73(4), 251-262.
16. Bremner J. M, Mulvaney C. S (1982) Nitrogen-total. *Methods of soil analysis, part 2 chemical and microbiological properties*, 9, 595-624
17. 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.
18. Ding, J. N. (2023). EFFECT OF CULTIVATION AND NATURAL RESTORATION ON SOIL MICROBIAL FUNCTIONAL STRUCTURE IN COLDREGION WETLANDS. *Applied Ecology & Environmental Research*, 21(2).
19. Doran J.W., and Parkin B.T. (1994). Defining and assessing soil quality. In: Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicek, D.F., Stewart, B.A. (Eds.), *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI, USA, pp. 3–21. Special Publication. Number 35.
20. Fu, Z., Liu, Y., Jiang, X., Guo, H., Wang, S., & Li, Z. (2025). Health of plateau soil environment: Corresponding relationship of heavy metals in different land use/cover types (LULCC). *Science of The Total Environment*, 973, 179162.

21. 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.
22. 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.
23. Hemmati, S., Yaghmaeian, N., Farhangi, M. B., & Sabouri, A. (2023). Soil quality assessment of paddy fields (in Northern Iran) with different productivities: Establishing the critical limits of minimum data set indicators. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(4), 10286-10296.
24. Ibno Namr, K., & Bel-Lahbib, S. (2023). Use of spatial variability of Soil Quality Index models and Soil properties for Soil Quality evaluation in the Irrigated Perimeter, Semi-arid Region of Morocco. *Earth Systems and Environment*, 7(4), 857-879.
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.
26. Karlen, D. L., Andrews, S. S. and Doran, J. W. (2001). Soil quality: Current concepts and applications. *Advances in Agronomy* 74: 1-40.
27. Kemper W.D. and Rosenau R.C. (1986). Aggregate stability and size distribution. In: Klute A (ed). *Methods of Soil Analysis. Part a: Physical and Mineralogical Methods*. American Society of Agronomy. Soil Science Society of America, Madison, WI. Pp 425–442.
28. Lemenih, M. (2004). Effects of land use changes on soil quality and native flora degradation and restoration in the highlands of Ethiopia: Implications for sustainable land management (No. 306).
29. Lindsay W.L. and Norvel W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for Zinc, Iron, Manganese and Copper
30. Maleki, S., Zeraatpisheh, M., Karimi, A., Sareban, G., & Wang, L. (2022). Assessing variation of soil quality in agroecosystem in an arid environment using digital soil mapping. *Agronomy*, 12(3), 578.
31. Manas, P., & De las Heras, J. (2024). Nutrient content in olive leaves through sustained irrigation with treated wastewater. *Scientia Horticulturae*, 330, 113084.
32. Martín-Sanz, J. P., de Santiago-Martín, A., Valverde-Asenjo, I., Quintana-Nieto, J. R., González-Huecas, C., & López-Lafuente, A. L. (2022). Comparison of soil quality indexes calculated by network and principal component analysis for carbonated soils under different uses. *Ecological Indicators*, 143, 109374.
33. Masto, R., Chhonkar, P., Singh, D. and Patra, (2008); A. Alternative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping, fertilization and managing for 31 years in the semi-arid soils of India. *Environ. Monit. Assess.*, 136: 419-435.
34. Nabiollahi, K., Taghizadeh-Mehrjardi, R., & Eskandari, S. (2018). Assessing and monitoring the soil quality of forested and agricultural areas using soil-quality indices and digital soil-mapping in a semi-arid environment. *Archives of Agronomy and soil science*, 64(5), 696-707.
35. Okolo, C. C., Gebresamuel, G., Retta, A. N., Zenebe, A., & Haile, M. (2019). Advances in quantifying soil organic carbon under different land uses in Ethiopia: a review and synthesis. *Bulletin of the National Research Centre*, 43, 1-24.

36. 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.
37. Page A.L., Miller R.H., and Keeney D.R.(1982). Methods of Soil Analysis, part2, chemical and microbiological properties. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of Aamerica, Madison, WI.
38. Poeplau, C., & Don, A. (2013). Sensitivity of soil organic carbon stocks and fractions to different land-use changes across Europe. *Geoderma*, 192, 189-201.
39. Poeplau, C., & Don, A. (2013). Sensitivity of soil organic carbon stocks and fractions to different land-use changes across Europe. *Geoderma*, 192, 189-201.
40. Rahmanipour, F., R. Marzaioli, H. A. Bahrami and Z. Fereidouni. 2014. Assessment of soil quality indices in agricultural lands of Qazvin Province, Iran. *Ecological Indicators*. 40: 19–26.
41. Raiesi, F. (2017). A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions. *Ecological indicators*, 75, 307-320.
42. Rangzan, K., Abdehvand, Z. Z., Mousavi, S. R., & Karimi, D. (2025). Spatial analysis of soil quality in agricultural land using machine learning and environmental covariates: A case study of Khuzestan Province. *Soil and Tillage Research*, 252, 106591.
43. Reynolds W.D., Drury C.F., Tan C.S., Fox C.A. and Yang X.M. (2009). Use of indicators and pore volume function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152: 252-263
44. Rhoades, J.D. (1982). Soluble salts. In: Page AL (ed) *Methods of soil analysis, part II*, 2nd ed., ASA, Monograph No. 9, Madison, WI, pp 167-179. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c10>
45. Shuite, Z., Demessie, A., & Abebe, T. (2025). Land use effect on soil quality and its implication to soil carbon storage in Aleta Chuko, Ethiopia. *Geoderma Regional*, 40, e00917.
46. Shukla M.K., Lal R. and Ebinger M. (2006). Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil Tillage Research*, 87:194–204.
47. Slade, H., & Wells, L. (2022). Soil quality enhancement with orchard age in pecan orchards of the southeastern US coastal plain. *HortScience*, 57(9), 1099-1105.
48. Torbert H.A., Krueger E. and Kurtene D. (2008). Soil quality assessment using fuzzy modeling. *International Agrophysics*, 22: 365-370.
49. Uthappa, A. R., Devakumar, A. S., Das, B., Mahajan, G. R., Chavan, S. B., Jinger, D., ... & Fahad, S. (2024). Comparative analysis of soil quality indexing techniques for various tree-based land use systems in semi-arid India. *Frontiers in Forests and Global Change*, 6, 1322660.
50. 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.
51. Xiong, J., Shao, X., Li, N., Yuan, H., Liu, E., & Wu, M. (2024). Effects of land-use on soil C, N, and P stocks and stoichiometry in coastal wetlands dependent on soil depth and latitude. *Catena*, 240, 107999.
52. 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.

53. Yanbing Q., Darilek J.L., Biao H., Yongcun Z., Sun W. and Gu Z. (2009). Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma*, 149: 325-334.
54. Yeneneh, N., Elias, E., & Feyisa, G. L. (2024). Monitoring soil quality of different land use systems: a case study in Suha watershed, northwestern highlands of Ethiopia. *Environmental Systems Research*, 13(1), 7.
55. Zahedifar, M., 2023. Assessing alteration of soil quality, degradation, and resistance indices under different land uses through network and factor analysis. *Catena*, 222, p.106807.
56. Zeraatpisheh, M., Bakhshandeh, E., Hosseini, M., & Alavi, S. M. (2020). Assessing the effects of deforestation and intensive agriculture on the soil quality through digital soil mapping. *Geoderma*, 363, 114139.
57. Zipori, I., Erel, R., Yermiyahu, U., Ben-Gal, A., & Dag, A. (2020). Sustainable management of olive orchard nutrition: A review. *Agriculture*, 10(1), 11.



Assessing the effects of land use change on soil quality using composite indicators and total and minimum dataset analyses

Samira Hemmati^{1*}, Kamran Moravej², Mir Naser Navidi³, Ahmad Golchin⁴, and Mohammad Sadegh Askari⁵

1-PhD student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. s.hemmati@znu.ac.ir

2-Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. kmoravej@znu.ac.ir

3-Associate Professor, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. n.navidi@areeo.ac.ir

4-Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. agolchin2011@yahoo.com

5-Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. askari@znu.ac.ir

«Research Article»

Received: July 12, 2025, and Accepted: September 20, 2025

Abstract

Land-use change is one of the major factors influencing the physical, chemical, and biological properties of soils, ultimately affecting their overall quality. This study aimed to evaluate the impact of converting barren lands with semi-arid natural vegetation into olive orchards on soil quality in the Loshan region, Guilan Province, Iran. A total of 76 soil samples were collected from the 0–30 cm depth under two land uses (barren land and olive orchard), and 24 physical, chemical, and biological properties were measured. Soil quality index (SQI) was calculated using two approaches: the simple additive index (SQI_A) and the weighted additive index (SQI_W), based on both the total dataset (TDS) and the minimum dataset (MDS). Principal Component Analysis (PCA) was applied to identify the most influential soil indicators. In barren lands, the selected MDS indicators included bulk density, soil organic carbon, electrical conductivity, magnesium, cation exchange capacity, sodium adsorption ratio, mean weight diameter of aggregates, and calcium carbonate. In olive orchards, key indicators consisted of clay content, organic carbon, microbial respiration, available phosphorus, sodium, sodium adsorption ratio, and calcium carbonate. The results indicated that soil quality was significantly higher in olive orchards compared to barren lands. SQI values in olive orchards ranged from 0.75 to 0.79, while in barren lands they varied between 0.41 and 0.48. Furthermore, the MDS approach provided reliable performance with fewer variables compared to TDS, and the weighted indices offered more accurate evaluations by accounting for the relative importance of indicators. Overall, the findings demonstrate that the conversion of barren lands into olive orchards under semi-arid conditions can substantially improve soil quality. The use of MDS-based quantitative indices combined with weighted models provides an effective approach for regional soil quality assessment and sustainable land.

Keywords: Principal Component Analysis, Soil health, Soil quality index.

* - Corresponding author's email: s.hemmati@znu.ac.ir

Cite this article: Hemmati, S., Moravej, K., Navidi, M.N., Golchin, A., and Askari, M.S., 2025. Assessing the effects of land use change on soil quality using composite indicators and total and minimum dataset analyses. *Journal of Soil Research*, 39(2), pp.225-246.



Investigating the effect of using zeolite and Nano fertilizer on the yield and antioxidant properties of peppermint essential oil under different deficit irrigation treatments

Elnaz Farajzadeh Memari Tabrizi* 

Department of Agronomy, Male.C, Islamic Azad University, Malekan, Iran. farajzadeh_e@malekaniiau.ac.ir

«Research Article»

Received: May 18, 2025, and Accepted: September 22, 2025

Abstract

In this study, The effect of water deficit stress and the use of zeolite combined with nano fertilizer on various characteristics of the medicinal plant peppermint on various characteristics of the medicinal plant peppermint, including essential oil percentage, essential oil yield, and antioxidant properties was investigated. The treatments included irrigation levels (irrigation after 70, 100, 130, and 160 mm of evaporation from Class A pan) in the main plots and zeolite and nano fertilizer treatments in the subplots. Zeolites were treated with complete nano fertilizer before planting and after air drying, they were mixed with the soil to a depth of 30 cm at a rate of 400 kg/ha. The experiment was conducted in two crop years 2022-2023 in a split plot format. The results showed that the water deficit stress treatment after 100 mm of evaporation from the pan caused a significant increase in the percentage of essential oil by 26.6% compared to the control while severe water deficit (after 160 mm of evaporation) had a negative effect on essential oil yield. The highest percentage of essential oil (24.2%) was observed in the combined treatment of zeolite + nano fertilizer, which was 46% higher than the control. In addition, the application of zeolite and nano fertilizer, especially in combination, significantly increased the yield of essential oil. The highest yield of essential oil (25.22 mL/m²) was recorded in the treatment of (irrigation after 100 mm of evaporation + zeolite + nano fertilizer), which was 26.6% higher than the control. Also, water deficit stress increased antioxidant compounds such as ascorbate peroxidase and glutathione peroxidase, especially in combination with zeolite and nano fertilizer. The combination of zeolite and nano fertilizer under water stress conditions not only increased phenolic and flavonoid compounds, but also significantly improved the antioxidant properties of the essential oil. In particular, under severe water stress, the combination of zeolite and nano fertilizer reduced the amount of malondialdehyde, which was a sign of reduced cell damage. Therefore, the statistical results show that the use of zeolite and nano fertilizer along with appropriate irrigation management can effectively increase the production of essential oil and improve the antioxidant properties of peppermint, especially under water stress conditions.

Keywords: Water stress, Medicinal plant, Adsorbent.

*- Corresponding author's email: farajzadeh_e@malekaniiau.ac.ir

Cite this article: Farajzadeh Memari Tabrizi, E., 2025. Investigating the effect of using zeolite and Nano fertilizer on the performance and antioxidant properties of peppermint essential oil under different dehydration regimes. *Journal of Soil Research*, 39 (2), pp.221-.234.





Assessment of some soil characteristics of apple orchards using nutrient index value approach

Aziz Majidi*

Associate Prof., Department of Soil and Water Research, West Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Urmia, Iran. A.majidi@areeo.ac.ir

«Research Article»

Received: July 01, 2025, and Accepted: September 20, 2025

Abstract

Evaluating soil properties is crucial for understanding soil health and optimizing apple production. This study was carried out to evaluate some physical, chemical, and fertility properties using nutrient index value (NIV) approach of apple orchards in West Azerbaijan Province, Iran. Samples were collected from 148 sampling points, each from one apple orchard, at the depths of 0–30 and 30–60 cm. Samples were analyzed for particle size distribution, saturation percentage, pH, EC, equivalent CaCO_3 (CCE), organic carbon (OC), available phosphorus (P_{ava}) and potassium (K_{ava}). Data generated from laboratory analysis were subjected to statistical analysis. Data interpretation was performed using the nutrient index value based on the common and Gomez classification methods. Results revealed that soils of the study area were medium to high alkaline (75%) with moderate to high calcium carbonate equivalent (89.5%). About 75% of samples were low (less than 0.9%) and medium (25%) in category of soil organic carbon (0.9–13.1%). Also, 50% of the soils had P_{ava} less than 2.6 mg/kg (low class) and 50% had optimal to high P_{ava} (more than 5.8 mg kg⁻¹). In more than 25% of the soils, the K_{ava} was low (144 mg/kg), and more than 75% were medium to high. The results indicated that 93.7%, 93%, 85.5%, 89.5%, 98.69%, 95.9%, and 83.4% of the study areas were in the high NIV classes for EC, pH, CCE, OC, P_{ava} , and K_{ava} , respectively. Similar results were obtained for all soil parameters, except for P_{ava} in the common method. In the common method, 78% of the soils showed the low NIV class. Hence, it is concluded that the soils of the region have relatively favorable characteristics for the growth of apple trees, and in the conditions of proper orchard management, high-quality apple production is achievable.

Key words: Calcareous soils, Soil fertility, Soil productivity potential.

* - Corresponding author's email: A.majidi@areeo.ac.ir

Cite this article: Majidi, A., 2025. Soil assessment of apple orchards using nutrient index value approach. Journal of Soil Research, 39 (2), pp.205–220.



Chemometric of potentially toxic elements in surface soils of Hamedan megacity

Nayereh Sadat Hosseini¹, and Soheil Sobhanardakani² *

1-PhD., Dept. of the Environment, Ha.C., Islamic Azad University, Hamedan, Iran. ns_hosseini@iau.ac.ir

2-Professor, Dept. of the Environment, Ha.C., Islamic Azad University, Hamedan, Iran. s_sobhan@iau.ac.ir

«Research Article»

Received: July 15, 2025, and Accepted: September 7, 2025

Abstract

Contamination of urban soil with toxic pollutants, as an important obstacle for sustainable development, is a challenge and common environmental and health concern of urban ecosystems all over the world. Therefore, this study was performed to evaluate the concentrations, spatial variations, pollution and toxicity of As, Cd, Cu, Ni, and Pb in the surface soil of Hamedan Megacity, in 2023. In so doing, a total of 108 urban surface soil samples (0-20 cm) were collected from 12 sampling sites with different land uses including industrial, commercial, and residential (4 sites of each land uses). After preparation and acid digestion of samples in the lab, concentrations of the tested elements were determined using Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES). Also, contamination factor (CF), pollution load index (PLI), the mean Effect Range Median Quotient (mERM-Q) and the mean Probable Effect Level Quotient (mPEL-Q) indices were calculated. The results of the spatial variation of the element contents showed the impact of human activities, especially industrial origin and traffic. The results of calculating the CF represented that the contamination of As, Cd, Cu, Ni and Pb were "low" to "high". Also, the mean values of PLI with 1.0 displayed "moderate" contamination conditions in the study area. Besides, the mean values of mERM-Q and mPEL-Q of As, Cd, Cu, Ni and Pb indicated that the probable elemental toxicity of the soil samples was 21% and in the "moderate toxicity" category. Based on the results, it can be acknowledged that industrial and traffic activities as the main and primary origin of these elements had significantly contributed to their pollution in soil of city of Hamedan. In conclusion, regular monitoring of the content of toxic elements and ecological and health risk assessment of the contaminated urban surface soil with PTEs are recommended in order to maintain the health of the environment and citizens.

Keywords: Urban soil, Toxic pollutants, Pollution index, Environmental toxicity.

* - Corresponding author's email: s_sobhan@iau.ac.ir

Cite this article: Hosseini, N.S, Sobhanardakani, S. 2025. Chemometric of potentially toxic elements in surface soils of Hamedan megacity. Journal of Soil Research, 39 (2), pp.189-.204.



Monitoring changes in vegetation health of agricultural lands using remote sensing data in Alborz province

Rasoul Kharazmi¹,* and Mirnasser Navidi²

1-Assistant Professor, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization, Karaj, Alborz, Iran. R.kharazmi@Areoo.ac.ir

2-Associate Professor, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization, Karaj, Alborz, Iran. N.navidi@Areoo.ac.ir

«Research Article»

Received: July 29, 2025, and Accepted: September 7, 2025

Abstract

Monitoring vegetation health, particularly within agricultural lands, is crucial for assessing ecological sustainability, crop productivity, and climate change resilience. This study investigates the temporal trends of vegetation health in Alborz Province, Iran, from 2017 to 2025 using Sentinel-2 satellite imagery and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Data were processed and analyzed on the Google Earth Engine platform. April and May were selected as the peak growing season, and cloud and shadow masking was applied using the Scene Classification Layer (SCL) band. Annual median composites were generated to reduce noise and eliminate the influence of atmospheric disturbances. A per-pixel linear regression was then conducted on the NDVI time series to quantify trends, which were categorized into five classes: strong decrease, slight decrease, stable, slight increase, and strong increase. The results revealed that over 80% of agricultural lands in Alborz Province exhibited a negative trend in NDVI, with 66.5% classified as strong decrease and 16% as slight decrease. Only 14% of the cropland showed positive trends, while 6% remained stable. These patterns reflect a significant degradation in vegetation health across the region. When compared with similar studies conducted in arid and semi-arid regions worldwide, these findings demonstrate consistent vulnerabilities of agricultural systems to climatic stress, water scarcity, and land-use pressures. The limited areas of NDVI improvement suggest potential best practices that could be scaled to reverse degradation trends. This research provides a valuable framework for decision-making in land use planning, water resource management, and sustainable agriculture development. The integration of satellite-based monitoring with cloud-computing platforms offers a scalable approach to track vegetation dynamics in data-scarce regions.

Keywords: Google Earth Engine, Vegetation Index, Land Use/Land Cover Changes, Linear Regression, Sentinel satellite.

* Corresponding author's email: R.kharazmi@Areoo.ac.ir

Cite this article: Kharazmi, R, Navidi, M.N., 2025. Monitoring changes in vegetation health of agricultural lands using remote sensing data in Alborz province. *Journal of Soil Research*, 39 (2), pp. 171-188.



Comparative study of chemical, biological and organic fertilizers on growth and essential oil production of German chamomile (*Matricaria chamomilla* L.)

Ali Asghar Zolfaghari^{1*}, Arezoo Dokhtabadian², Mohamad Reza Yazdani³, Davoud Kartoolinejad⁴, and Elaheh Nikouee⁵

1-Associate Professor ,Department of Desertification, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnam, Iran. azolfaghari@semnan.ac.ir

2-Graduate student of Educational Department of Desertification, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnam, Iran. dokhtabadian@semnan.ac.ir

3-Associate Professor of Educational Department of Desertification, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnam, Iran. m_yazdani@semnan.ac.ir

4-Assistant Professor of Dryland Forestry Department, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnam, Iran. kartooli58@semnan.ac.ir

5-Graduate student of Dryland Forestry Department, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnam, Iran. elahe.ni76@gmail.com

«Research Article»

Received: June 16, 2024, and Accepted: September 03, 2025

Abstract

The management of different types of chemical and organic fertilizers and their residues in soil in terms of plant performance and environmental effects, especially in dry and semi-dry regions such as Iran, is of great importance. In order to investigate the effects of some chemical, biological, animal, humic acid, vermicompost fertilizers, and their residues on growth rate, flower yield, essential oil yield, chamazulene yield, and medicinal plant components of German chamomile (*Matricaria chamomilla* L.), an experiment was conducted in pots in a completely randomized design with four replications at Varamin Station of Agricultural Research and Education Center of Tehran Province, during one growing season during the years 2017–2018. Chemical fertilizer treatment (NPK) was applied at two levels. Level 1 consisted of 1.5 g of urea (250 kg/ha), 3 g of triple superphosphate (TSP) (500 kg/ha), and 1.3 g of potassium sulfate (216 kg/ha). Level 2 was a combination of 3 g of urea (500 kg/ha), 4 g of TSP (665 kg/ha), and 2.6 g of potassium sulfate (432 kg/ha). The vermicompost treatment was applied at two levels: 30 g (5 t/ha) and 60 g (10 t/ha). Farmyard manure was also applied at two levels: 120 g of decomposed bovine manure (20 t/ha) and 180 g of decomposed bovine manure (30 t/ha). Humic acid was used in two application methods—fertigation through irrigation and foliar spray—at a concentration of 5 per thousand (5 g /L of water). The biological fertilizer (BNPK), containing nitrogen-fixing, phosphate-solubilizing, and potassium-solubilizing bacteria, was applied at 125 mL/pot for each of the ten treatments, including a control (no fertilizer). The results indicated that the application of the second level of chemical fertilizer significantly enhanced the growth parameters of chamomile compared to the control. The highest values recorded were for plant height (34.35 cm), number of flowers (92 flowers), flower diameter (1.51 cm), dry weight of flowers (18.70 g), percentage of essential oil in flowers (0.503%), and essential oil yield per ten plants (0.939 g) were observed in the treatment utilizing the second level of NPK chemical fertilizer. The highest essential oil yield and chamazulene yield were also observed in the biological fertilizer treatment, which had a significant difference compared to the control. The biological fertilizer treatment was also able to create desirable flower, essential oil, and chamazulene yields, which is recommended for use according to the goals of organic and sustainable agricultural production. Based on the results, positive effects of biological fertilizers on the medicinal plant chamomile can be expected. In the light of the favorable performance of the biofertilizer treatment, its application is advisable in alignment with the objectives of organic and sustainable agriculture.

Keywords: Essential oil, Chamazulene, Compost, Biological fertilizer, Yield components, German chamomile.

*_ Corresponding author's email: azolfaghari@semnan.ac.ir

Cite this article: Zolfaghari, AA, Dokhtabadian, A., Yazdani, M.R., Kartoolinejad, D., Nikouee, E., 2025 Comparative study of chemical, biological and organic fertilizers on growth and essential oil production of German chamomile (*Matricaria chamomilla* L.). Journal of Soil Research, 39 (2), pp. 153-169.



Contents

Subject

Comparative study of chemical, biological and organic fertilizers on growth and essential oil production of German chamomile (*Matricaria chamomilla* L.).....7
Ali Asghar Zolfaghari, Arezoo Dokhtabdian, Mohamad Reza Yazdani, Davoud Kartoolinejad, and Elaheh Nikouee

Monitoring changes in vegetation health of agricultural lands using remote sensing data in Alborz province.....8
Rasoul Kharazmi, and Mirnaser Navidi

Chemometric of potentially toxic elements in surface soils of Hamedan megacity.....9
Nayereh Sadat Hosseini, and Soheil Sobhanardakani

Assessment of some soil characteristics of apple orchards using nutrient index value approach.....10
Aziz Majidi

Investigating the effect of using zeolite and Nano fertilizer on the performance and antioxidant properties of peppermint essential oil under different deficit irrigation treatments11
Elnaz Farajzadeh Memari Tabrizi

Assessment of land use change on soil quality using integrated indices and full-minimum dataset analysis12
Samira Hemmati, Kamran Moravej, Mirnaser Navidi, Ahmad Golchin, and Mohammad Sadegh Askari

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

Soil and Water Research Institute Soil Science Society of Iran

**Research and Soientific Journal
Iranian Journal of Soil Research**

**Vol. 39, No.2
2025**

***Manager-in-Charge:* Hadi Asadi Rahmani, PhD
Director General, Soil and Water Research Institute
Editor-in-Chief: Karim Shabazi, 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
Journal Website: 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.2\ 2025

ISSN: 2228 -7124

Contents Subject

Comparative study of chemical, biological and organic fertilizers on growth and essential oil production of German chamomile (*Matricaria chamomilla* L.).....7
Ali Asghar Zolfaghari, Arezoo Dokhtabdian, Mohamad Reza Yazdani, Davoud Kartoolinejad, and Elaheh Nikouee

Monitoring changes in vegetation health of agricultural lands using remote sensing data in Alborz province.....8
Rasoul Kharazmi, and Mirnaser Navidi

Chemometric of potentially toxic elements in surface soils of Hamedan megacity.....9
Nayereh Sadat Hosseini, and Soheil Sobhanardakani

Assessment of some soil characteristics of apple orchards using nutrient index value approach.....10
Aziz Majidi

Investigating the effect of using zeolite and Nano fertilizer on the performance and antioxidant properties of peppermint essential oil under different deficit irrigation treatments11
Elnaz Farajzadeh Memari Tabrizi

Assessment of land use change on soil quality using integrated indices and full-minimum dataset analysis12
Samira Hemmati, Kamran Moravej, Mirnaser Navidi, Ahmad Golchin, and Mohammad Sadegh Askari