



مدیریت اراضی

شاپا ۶۲۰۵-۲۳۴۵

جلد ۱۳ / شماره ۱ / سال ۱۴۰۴

عنوان

صفحه

- تحلیل عوامل مؤثر بر تغییر کاربری اراضی کشاورزی در ایران با استفاده از تکنیک دلفی فازی..... ۱
محبوبه آسیمه و ابوالفضل آزادی
- تأثیر بیوپار و فسفر بر برخی خصوصیات زراعی گیاه کلزا و کارایی مصرف آب در یک خاک لوم قلیایی..... ۱۷
سهیل سلیمی ترازوج، عادل ریحانی تبار و نصرت اله نجفی
- مدل سازی عوامل مؤثر بر تمایل کشاورزان نسبت به اجرای طرح یکپارچه سازی اراضی..... ۴۳
مسلم سواری، آمنه سواری ممبئی و ابوالمحمد بندری
- تأثیر فشردگی خاک بر عملکرد محصول و ارزش اقتصادی زمین..... ۵۹
جهانبخش میرزاوند، خسرو شهبازی، عزیز مجیدی و زهرا کاظمی
- بررسی و تحلیل برخی از مهم ترین چالش های اراضی کشاورزی استان خوزستان (با تأکید بر محدودیت های منابع خاک)..... ۷۹
ابوالفضل آزادی، علیرضا جعفرنژادی و محی الدین گوشه
- کاربرد بیوپار در آلودگی زدایی آب و خاک از آرسنیک: یک رهیافت امیدبخش و دوستدار محیط زیست..... ۱۰۵
عادل ریحانی تبار
- فیزیولوژی کلسیم و مدیریت مصرف آن در باغ های مرکبات..... ۱۲۷
علی اسدی کنگرشاهی و نگین اخلاقی امیری

نشریه علمی مدیریت اراضی
صاحب امتیاز: مؤسسه تحقیقات خاک و آب

جلد ۱۳ شماره (۱)

سال ۱۴۰۴

مدیر مسؤول: دکتر هادی اسدی رحمانی رئیس مؤسسه تحقیقات خاک و آب

سر دبیر: دکتر حسین بشارتی استاد مؤسسه تحقیقات خاک و آب

اعضاء هیأت تحریریه (به ترتیب حروف الفبا):

دکتر حسین اسدی	استاد پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
دکتر حسین بشارتی	استاد مؤسسه تحقیقات خاک و آب
دکتر محمدرضا بلالی	استادیار مؤسسه تحقیقات خاک و آب
دکتر حسینعلی بهرامی	استاد دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس
دکتر محمدعلی حاج عباسی	استاد دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان
دکتر محمدحسن روزی طلب	استاد سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
دکتر سعید سعادت	دانشیار مؤسسه تحقیقات خاک و آب
دکتر محمدرضا شاهپسند	دانشیار مرکز آموزش عالی امام خمینی (ره)
دکتر ناصر علی اصغرزاد	استاد دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز
دکتر منوچهر گرجی	استاد پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
دکتر محمدحسین محمدی	دانشیار پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
دکتر عزیز مومنی	دانشیار مؤسسه تحقیقات خاک و آب

مدیر داخلی:	دکتر فرهاد مشیری
ویراستار انگلیسی:	دکتر عزت‌اله روستازاده
صفحه آرایی:	مهندس فاطمه آقاجانی
تعداد انتشار در سال:	دو شماره

پایگاه الکترونیکی نشریه مدیریت اراضی: http://lmj.areo.ir	این نشریه در پایگاه‌های علمی زیر نمایه می‌شود:
آدرس پایگاه الکترونیکی مجله: http://lmj@areo.ir	پایگاه استنادی علوم جهان اسلام (ISC): www.isc.gov.ir
آدرس الکترونیکی مجله: jolm9297@gmail.com	پایگاه سیویلیکا: https://civilica.com
	پایگاه بانک اطلاعات نشریات کشور (Magiran): https://www.magiran.com

آدرس: کرج - میدان استاندارد، جاده مشکین دشت، بعد از رزکان نو، بلوار امام خمینی - کد پستی ۳۱۷۷۹۹۳۵۴۵
تلفن و نمابر: ۳۶۳۲۰۱۶۰ (۰۲۶)

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

- تحلیل عوامل مؤثر بر تغییر کاربری اراضی کشاورزی در ایران با استفاده از تکنیک دلفی فازی..... ۱
محبوبه آسیمه و ابوالفضل آزادی
- تأثیر بیوچار و فسفر بر برخی خصوصیات زراعی گیاه کلزا و کارایی مصرف آب در یک خاک لوم قلیایی..... ۱۷
سهیل سلیمی ترازوج، عادل ریحانی تبار و نصرت‌اله نجفی
- مدل سازی عوامل مؤثر بر تمایل کشاورزان نسبت به اجرای طرح یکپارچه سازی اراضی..... ۴۳
مسلم سواری، آمنه سواری ممینی و ابوالمحمد بندری
- تأثیر فشردگی خاک بر عملکرد محصول و ارزش اقتصادی زمین..... ۵۹
جهانبخش میرزاوند، خسرو شهبازی، عزیز مجیدی و زهرا کاظمی
- بررسی و تحلیل برخی از مهم ترین چالش‌های اراضی کشاورزی استان خوزستان (با تأکید بر محدودیت‌های منابع خاک)..... ۷۹
ابوالفضل آزادی، علیرضا جعفرنژادی و محی‌الدین گوشه
- کاربرد بیوچار در آلودگی‌زدایی آب و خاک از آرسنیک: یک رهیافت امیدبخش و دوستدار محیط زیست..... ۱۰۵
عادل ریحانی تبار
- فیزیولوژی کلسیم و مدیریت مصرف آن در باغ‌های مرکبات..... ۱۲۷
علی اسدی کنگرشاهی و نگین اخلاقی امیری

راهنمای نگارش مقاله برای چاپ در مجله مدیریت اراضی

با عنایت به اهمیت انتشار یافته های پژوهشی، انتقال و گسترش رهیافت های علمی برای حل مسائل و لزوم انتشار و معرفی دیدگاه ها، نظریات و فن آوریهای نوین در مدیریت اراضی، موسسه تحقیقات خاک و آب بر آن شد تا نسبت به انتشار مجله علمی مدیریت اراضی به عنوان اولین مجله تخصصی در حوزه علم مدیریت اراضی اهتمام ورزیده و سطح آگاهی ها و دانش موجود را در این زمینه ارتقاء بخشد، تا جامعه علمی و کارشناسان حوزه کشاورزی و منابع طبیعی با مفاهیم جدید علمی در زمینه مدیریت اراضی آشنا گردند.

مجله مدیریت اراضی، مجله ای علمی- تخصصی است که با هدف انتشار یافته های تحقیقاتی، معرفی، ترویج و بسط آگاهی های علمی و ارتقاء سطح دانش در بین جامعه علمی مربوطه منتشر می شود، لذا مقالات پژوهشی، کاربردی، ترویجی، گردآوری، علمی مروری، ترجمه ای، روش شناسی، تحلیلی و انتقادی در زمینه های زیر و با هدف اشاعه دانش و ارتقاء سطح آگاهی مخاطبان مشروط بر این که براساس مبانی علمی نگاشته شده و با نگرشی عالمانه به مسائل مدیریت اراضی پرداخته باشند در این مجله قابل پذیرش خواهند بود.

- مدیریت حاصلخیزی خاک
- مدیریت آب در اراضی کشاورزی
- مدیریت اراضی در حوزه آبخیز
- مباحث اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی در مدیریت اراضی
- مدیریت اراضی و محیط زیست
- نقش قوانین و مقررات در مدیریت اراضی
- مدیریت بهره برداری پایدار از اراضی
- نقش ویژگیهای خاک در مدیریت اراضی

شرایط پذیرش مقاله

مقاله می بایست حاوی موضوعی تازه بوده و قبلاً در هیچ یک از نشریات فارسی زبان و در مجلات لاتین با همین عنوان و محتوا منتشر نشده باشد و یا همزمان برای مجله دیگر فرستاده نشده باشد. مقالاتی که خلاصه آنها در مجامع علمی داخلی و خارجی ارائه و چاپ شده باشد با افزودن مطالب جدید و تبدیل به مقاله کامل قابل بررسی خواهند بود. دفتر مجله در ویراستاری، چاپ و یا عدم چاپ مقالات آزاد است. مسئولیت صحت مطالب بر عهده نگارنده/گان می باشد. مقاله باید به زبان فارسی روان و عاری از غلط های نگارشی باشد. از آوردن واژه های بیگانه که معادل فارسی دارند جدا پرهیز گردد. گواهی پذیرش مقاله فقط پس از اتمام مراحل ویراستاری، تایید داور نهایی و تصویب هیات تحریریه صادر و مراتب با درج شماره جلد به اطلاع نگارنده/گان خواهد رسید. مقالات ارسالی به دفتر مجله پس از طی مراحل داوری مسترد نمی شود.

نامه درخواست و تعهد نامه

ارسال نامه درخواست بررسی مقاله خطاب به سردبیر مجله با امضای نویسنده مسئول مقاله ضروری است. در فرم تعهدنامه، لازم است نویسندگان نسبت به امضای آن اقدام نمایند. فرم تعهد نامه از وبگاه مجله (<http://lmj.areo.ir>) قابل دریافت می باشد. تصویر الکترونیک نامه درخواست و فرم تعهد نامه تکمیل شده در قسمت پرونده مقاله در صفحه شخصی

نویسنده مسئول (ارسال کننده مقاله) قابل بارگزاری می باشد.

برگ شناسه

برگ شناسه مقاله در یک صفحه مجزا به دو زبان فارسی و انگلیسی شامل عنوان مقاله، نام و نام خانوادگی نگارنده/گان، موقعیت شغلی نگارنده/گان، نام دانشگاه یا مؤسسه پژوهشی که نگارنده/گان در آن اشتغال دارند، نشانی کامل نگارنده/گان، پست الکترونیکی همه نویسندگان و نام و مشخصات نگارنده مسئول می باشد. برگ شناسه مقاله در قسمت پرونده مقاله در صفحه شخصی نویسنده مسئول (ارسال کننده مقاله) قابل بارگزاری می باشد.

نحوه ارسال مقاله

پیشنهاد چاپ مقالات در این مجله به صورت الکترونیکی بوده و در وبگاه مجله به آدرس <http://lmj.areo.ir> اطلاعات لازم آمده است.

برای ارسال مقاله به صورت الکترونیکی، مراحل زیر لازم است:

- پرکردن فرم ثبت نام و ورود به وبگاه با نام کاربری اختصاصی
- ورود به صفحه شخصی (در بالای صفحه)
- پر کردن فرم ارسال مقاله و اطلاعات و مشخصات مربوط
- بررسی مقاله در صفحه شخصی و افزودن ضمایم و اطلاعات مرتبط
- تأیید نهایی مقاله برای آغاز بررسی آن

راهنمای تهیه مقالات

مقاله حداکثر در ۱۵ صفحه A4 با فاصله خطوط ۱/۵ و حاشیه های ۳ سانتی متر از هر طرف و به صورت تک ستونی تایپ شود. نوع قلم فارسی و انگلیسی و اندازه آنها مطابق جدول (۱) استفاده شود. پیش از نقطه (.) و کاما (،) گذاشتن فاصله لازم نیست، لیکن پس از آنها، یک فاصله لازم است. اصول نگارش زبان فارسی به طور کامل رعایت شده و از به کاربردن اصطلاحات انگلیسی که معادل فارسی آنها در فرهنگستان زبان فارسی تعریف شده اند، حتی الامکان پرهیز گردد.

جدول ۱- نوع و اندازه قلم بخش های مختلف مقاله

موقعیت استفاده	نام قلم	اندازه قلم
عنوان مقاله	B Lotus پر رنگ	14
متن مقاله	B Lotus	12
عناوین بخش های مقاله	B Lotus پر رنگ	12
نام مؤلفان	B Lotus پر رنگ	12
کلمه چکیده و کلمات کلیدی	B Lotus پر رنگ	12
عناوین جداول و اشکال	B Lotus پر رنگ	11
متن جداول و شکل ها و منابع	B Lotus	11
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 مجله علمی "مدیریت اراضی" به همراه فرم تعهدنامه 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

مقالات باید شامل عنوان، چکیده فارسی و انگلیسی (حداکثر تا ۳۰۰ کلمه)، واژه های کلیدی، مقدمه، مواد و روش ها، نتایج و بحث، نتیجه گیری، پیشنهادها، تشکر و قدردانی (در صورت نیاز) و فهرست منابع باشد. در نگارش مقالات گردآوری، مروری، تحلیلی و انتقادی بر اساس شرایط مقاله قسمت های مواد و روش ها و همچنین نتایج و بحث می تواند حذف گردد. در این شرایط نگارش سایر قسمت های مقاله الزامی است.

عنوان مقاله

عنوان مقاله باید روان، گویا، مختصر، مفید و جذاب بوده و در برگیرنده محتوای موضوع مقاله 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، پست الکترونیک نویسندگان درج گردد.

چکیده

چکیده بایستی شامل حداکثر ۳۰۰ کلمه بوده و بیانگر زمینه و هدف، روش بررسی، یافته ها، نتیجه گیری و ترجیحا دریک 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 واژه های کلیدی از تکرار واژه هایی که در عنوان مقاله آمده است خودداری فرمایید. واژه های کلیدی خیلی عمومی نباشد.

مقدمه

مقدمه باید دربرگیرنده اهمیت پژوهش انجام شده باشد و به بیان مساله با مروری بر مطالعات و مشاهدات مرتبط با پژوهش که در گذشته انجام شده بپردازد و به منابع معتبری که در انتهای مقاله ذکر شده، استناد کند. در ادامه مطالب، وجه تمایز پژوهش حاضر نسبت به مطالعات قبلی و لزوم و وجوب آن و در انتهای مقدمه هدف اصلی پژوهش نگاشته شود. مقالاتی که موضوع آن 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 کننده ای نداشته باشد چاپ نخواهد شد.

مواد و روشها

در این قسمت باید شرح مواد و روشهای مورد استفاده در پژوهش، جامعه آماری، روشهای نمونه گیری، اندازه گیریهای آزمایشی و نحوه تجزیه و تحلیل آماری آورده شود. در صورتی که از روشهای متداول یا قبلا منتشر شده استفاده شده باشد، از شرح جزئیات خودداری و فقط به ارائه اصول و ذکر مأخذ اکتفا شود. در نگارش مقالات گردآوری، مروری، تحلیلی و انتقادی براساس شرایط مقاله این قسمت می تواند حذف گردد و مقاله ممکن است بخش های دیگری را شامل شود که مطالب در قالب عناوینی متناسب با موضوع مقاله ارائه می گردند.

نتایج و بحث

در این بخش، نتایج بدست آمده از پژوهش به صورت نوشتار همراه شکل و جدول بیان گردد. از بکار بردن عنوان هایی مانند

نمودار، عکس و نقشه خودداری و کلیه آنها با عنوان "شکل" درج شوند. نتایج ارائه شده در جدول‌ها 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 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.

برای درج عنوان هر شکل، پس از کلمه شکل و شماره آن، نقطه و سپس عنوان ذکر شود. اختصارات موجود در شکل‌ها و جدول‌ها باید در زیرنویس توضیح داده شوند. تمام اعداد متن و توضیحات جدول‌ها و شکل‌ها باید به زبان فارسی ارائه گردد. اندازه فونت توضیحات محورهای نمودارها و اعداد به اندازه کافی بزرگ باشد تا در صورت کوچک کردن نیز خوانا باشند. جدول‌ها و نمودارها حتی المقدور در متن مقاله جاسازی شوند. در صورت لزوم می‌توان از تصاویر و یا عکس‌های مناسب و گویا در مقاله استفاده نمود. محل ارائه تصاویر در متن مقاله مشخص شده باشد. فایل الکترونیک تصاویر در قسمت پرونده مقاله در صفحه شخصی نویسنده مسئول و یا ارسال کننده مقاله در وبگاه مجله بارگزاری گردد. در این بخش یافته‌های جدید و مهم باید با یافته‌های موجود در منابع مقایسه شود و دلایل قبول و رد آنها مورد بحث قرارگیرد، از تکرار یافته‌ها خودداری شود. یافته‌های جدید و یافته‌های پیش‌بینی شده مقایسه شود. در نگارش مقالات گردآوری، مروری، تحلیلی و انتقادی بر اساس شرایط مقاله بخش نتایج و بحث می‌تواند حذف شده و مطالب در قالب عناوینی متناسب با موضوع مقاله ارائه گردد. لازم است عناوین مناسب و جذابی برای این قسمت‌ها انتخاب شده و در مورد آنها به صورتی کاملاً مستند مطلب نوشته شود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این قسمت باید موارد کاربردهای عملی و تئوری نتایج حاصل از پژوهش و نتیجه کلی پژوهش بیان گردد. این بخش منعکس کننده نظر و برداشت کلی نگارنده/گان نسبت به محتوا و مطالب مقاله می‌باشد. نکته بسیار مهم این است که خواننده دریابد که در این مقاله یک مطلب یا موضوعی بدیع و نو عرضه شده است. در این بخش ارائه یک پیام بطور روشن حائز اهمیت می‌باشد. راهکارها و فرضیه‌های جدید نیز پیشنهاد گردد. پیشنهادهایی برای پژوهش و کارهای مشابه در آینده در این بخش ارائه شود.

تشکر و قدردانی

در این بخش نگارنده/گان می‌توانند از اشخاص، سازمانها و افراد ذیربطی که در اجرای پژوهش و تدوین مقاله همکاری داشته‌اند، تشکر و قدردانی نمایند. این قسمت باید کوتاه و در حدود ۵۰ کلمه باشد.

فهرست منابع

فهرست منابع مورد استفاده در پایان متن به صورت **پیوسته و تماماً انگلیسی** ارائه شوند. منابع مورداستفاده 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، 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، حرف اول نام اوکین نویسنده، و سپس نام خانوادگی نویسنده دوم، و حرف اول نویسنده دوم، 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 و مشخصات آن و سپس نام مترجم (مترجمان) و ناشر ذکر شود

مثال‌های برای تنظیم مقاله از مجله علمی

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

ارجاع به 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 Laird, D.A., 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 کتاب

Olsen, S.R. and Sommers, L.E., 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.

مقاله با یک نویسنده

Fukugawa, N., 2022. Effects of the quality of science on the initial public offering of university spinoffs: evidence from japan. Scientometrics, 127(8), pp.4439–4455

مقاله با دو نویسنده

Haunschild, R. and Bornmann, L., 2022. Relevance of document type in the scores calculation of a specific field-normalized indicator: Are the scores strongly dependent on or nearly independent of the document type handling? Scientometrics, 127(8), pp.4419–4438

مقاله با سه نویسنده

Vakkari, P., Chang, Y.W. and Jarvelin, K., 2022. Largest contribution to LIS by external disciplines as measured by the characteristics of research articles. Scientometrics, 127(8), pp.4419–4438

مقاله با بیش از سه نویسنده

Wheeler, J., Pham, N.M., Arlitsch, K. and Shanks, J.D., 2022. Impact factions: assessing the citation impact of different type of open access repositories. Scientometrics, 127(8), pp.4419–4438

*ضروری است شناسه منحصر به فرد DOI در انتهای ارجاعات هر مقاله درج گردد.

*همچنین ضروری است فهرست منابع فارسی به زبان انگلیسی برگردانده شده و در انتهای منبع داخل پرانتز عبارت "in persian" نوشته شود.

*در تمام منابع مورد استفاده نام ژورنال‌ها به صورت کامل نوشته شود.

هنگام ارجاع مطلبی در متن:

چنانچه منبع دارای یک نگارنده باشد، نام نگارنده و سال قید می‌گردد مانند: (Johnson, 1995). اگر منبع دارای دو نگارنده باشد، نام هر دو ذکر می‌گردد. مانند: (Lee & Wu, 2005)، اگر منبع دارای بیش از دو نگارنده باشد فقط نام نگارنده اول با ذکر عبارت "و همکاران" (et al.) درج گردد مانند: کیم و همکاران (Kim et al., 2008).

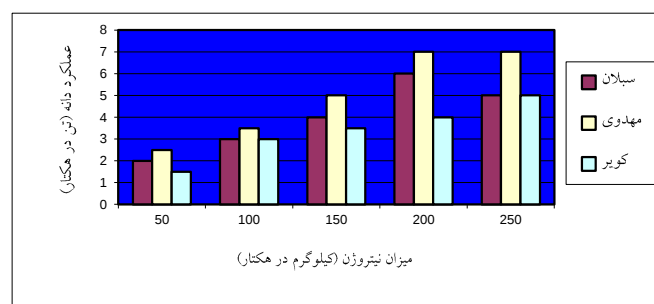
جدول نامناسب

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

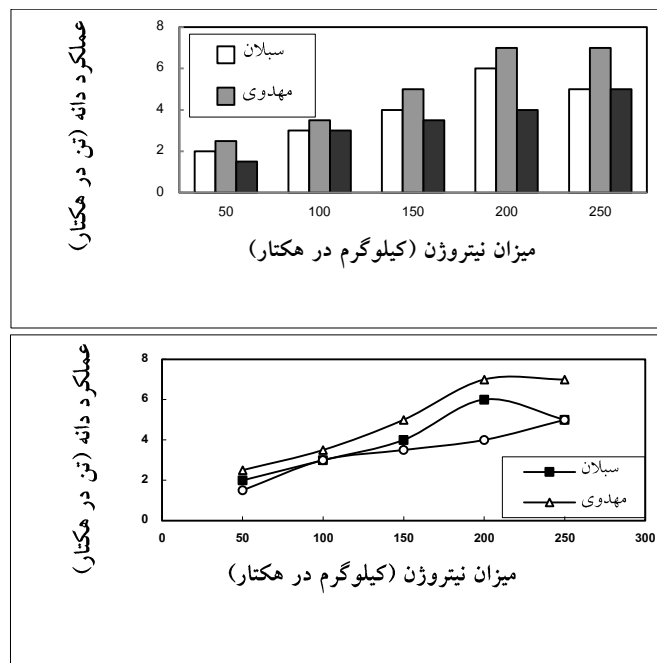
جدول مناسب

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

شکل نامناسب



شکل مناسب



نشریه علمی مدیریت اراضی

دکتر سپیده ابریشم کش.....	۱ دآوری
دکتر حسین اسدی.....	۳ دآوری
دکتر سیروس جعفری.....	۲ دآوری
دکتر محمدعلی حاج عباسی.....	۲ دآوری
دکتر یعقوب حسینی.....	۲ دآوری
دکتر حمیدرضا رحمانی.....	۱ دآوری
دکتر غلامرضا زارعیان.....	۱ دآوری
دکتر علی زین الدینی.....	۲ دآوری
دکتر جهانشاه صالح.....	۱ دآوری
دکتر حسن علیپور.....	۲ دآوری
دکتر مصطفی مارزی.....	۳ دآوری
دکتر محمد حسین محمدی.....	۲ دآوری
دکتر نصرت اله نجفی.....	۲ دآوری
دکتر عباس نوروزی.....	۴ دآوری
دکتر میرناصر نویدی.....	۱ دآوری

فرم تعهد نامه

نشریه مدیریت اراضی

اینجانب نویسنده مسئول مقاله زیر:

موارد زیر را به آگاهی می رسانم:

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.
۵. نامه پذیرش براساس ترتیب و تعداد نویسندگان در فرم تعهدنامه صادر میگردد.

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

تحلیل عوامل مؤثر بر تغییر کاربری اراضی کشاورزی در ایران با استفاده از تکنیک

دلفی فازی

محبوبه آسیمه و ابوالفضل آزادی *

دانشجوی دکتری توسعه کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران. asimeh@gmail.com

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

a.azadi@areeo.ac.ir

دریافت: آبان ۱۴۰۳ و پذیرش: فروردین ۱۴۰۴

چکیده

تبدیل کاربری اراضی کشاورزی و عوامل تشدید کننده‌ی آن از جمله چالش‌های زیست‌محیطی در کشور بوده و پس از کم‌آبی، از مهم‌ترین مشکلات اساسی کشاورزی ایران محسوب می‌گردد. بنابراین، شناسایی عوامل مؤثر بر تغییر و تبدیل کاربری اراضی حائز اهمیت است. هدف اصلی این پژوهش تحلیل عوامل مؤثر بر تغییر و تبدیل کاربری اراضی کشاورزی به کاربری‌های دیگر مانند تفرجگاه و غیره در ایران است. برای بررسی این موضوع، تعداد دوازده نفر از متخصصان مراکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی کشور در زمینه‌ی ارزیابی و تغییر کاربری اراضی با استفاده از روش نمونه‌گیری هدفمند و گلوله‌برفی و تکنیک دلفی فازی طی دو مرحله، جهت دستیابی به توافق گروهی بین خبرگان استفاده شد و از ۷۲ شاخص استخراج شده، ۲۸ شاخص در چهار گروه (اقتصادی، اجتماعی _ فرهنگی، قانونی _ نهادی، محیطی _ زیر ساختی) به عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تغییر کاربری اراضی انتخاب شدند. نتایج نشان داد عامل قانونی _ نهادی حائز اهمیت بیش‌تری بود و در این بعد عدم برنامه‌ریزی مناسب دولت برای حفظ اراضی کشاورزی با وزن ۰/۰۹۹۲، عدم برخورد قاطع حاکمیت با تغییر دهندگان کاربری اراضی با وزن ۰/۰۹۷۳ و وابستگی سازمان‌ها و ادارات به درآمد ناشی از تغییر کاربری با وزن ۰/۰۹۶۸ در رتبه‌های اول تا سوم قرار گرفتند. در نظر گرفتن این عوامل می‌تواند نقش حائز اهمیتی در مدیریت تغییر کاربری اراضی کشاورزی داشته باشد. لذا لزوم تجدید نظر در ساختار حکمرانی اراضی و بررسی و اصلاح خلأهای قوانین تغییر کاربری اراضی و تبصره‌های قانونی موجود، جلوگیری از خرد شده اراضی کشاورزی و فرهنگ‌سازی و ارتقاء سطح اطلاعات جوامع روستایی در خصوص ضرورت حفظ کاربری اراضی کشاورزی و آشنایی با پیامدها و آسیب‌های تغییر کاربری اراضی کشاورزی از سوی دولت می‌تواند راهکار مناسبی برای حفاظت از زمینهای کشاورزی باشد.

واژه‌های کلیدی: کاربری اراضی، اراضی کشاورزی، ایران، تکنیک دلفی فازی، روش گلوله برفی

* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: a.azadi@areeo.ac.ir

نوع مقاله: پژوهشی



مقدمه

تغییر کاربری اراضی فاکتور مهمی است که الگوی توسعه یک منطقه را نشان می‌دهد و از دیرباز تمرکز تحلیلی در زمینه‌های جغرافیا، منابع طبیعی و برنامه‌ریزی شهری و روستایی بوده است (Xie et al., 2022; Ellis et al., 2013; Wang et al., 2022). اراضی کشاورزی یکی از این عوامل مهم به شمار می‌رود که بهره‌گیری و ترکیب متناسب آن با سایر نهاده‌ها و منابع موجود، تضمین‌کننده‌ی ارتقای بهره‌وری و امنیت غذایی می‌شود (Kalantari & Abdollahzadeh, 2008; Asimeh et al., 2020; Liu et al., 2022). اگر خلاف این امر اتفاق بیفتد، باید منتظر بروز ناپایداری از جمله تغییر غیراصولی اراضی کشاورزی در نظام بهره‌برداری بود. لذا، از کاربری مناسب اراضی کشاورزی به‌عنوان هسته‌ی اصلی برنامه‌ریزی کشاورزی نام برده می‌شود؛ زیرا برنامه‌ریزی کاربری و آمایش سرزمین نقشی مهم در ساماندهی مکانی روستاها، اقتصاد کشاورزی و حفظ محیط‌زیست ایفا می‌کند (Mehri et al., 2013; Liu & Zhou, 2021; Qu et al., 2023). امروزه رشد جمعیت از یک‌سو و محدودیت منابع از سوی دیگر، زمینه‌ساز مسائل و مشکلاتی در ارتباط با کاهش سطح اراضی طبیعی شده است (Asimeh & Nooripoor, 2021; Song et al., 2018). در بعد کلان عواملی مانند اقتصاد جهانی و تغییر اقلیم، تغییرات کاربری زمین به‌ویژه در بخش منابع طبیعی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در مقیاس خرد نیز، مسائلی مانند تغییرات جمعیتی، توسعه‌ی سریع شهری و سیاست‌های محلی، تغییرات وسیعی در الگوی کاربری اراضی ایجاد می‌نماید (Voinov et al., 2008; Geist & Lambin, 2002). بالا بودن هزینه‌های تولید محصولات، درآمدزایی پایین، فصلی بودن اکثر محصولات بخش کشاورزی در مقایسه با فعالیت‌های بخش صنعت و خدمات، عدم ایجاد جذابیت و انگیزه‌ی کافی مادی برای بهره‌برداران این بخش، تمایل آن‌ها را به استمرار اشتغال در بخش کشاورزی کاهش می‌دهد (Saadi & Awatfi Akmal, 2017).

از سویی، از تغییر کاربری اراضی کشاورزی و عوامل تشدیدکننده‌ی آن به‌عنوان یکی از چالش‌های زیست‌محیطی قرن اخیر نام برده می‌شود و در شرایط حاضر به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های اساسی کشاورزی ایران محسوب می‌شود و نمونه‌ای مهم از تأثیرگذاری انسان بر محیط‌زیست به شمار می‌رود (Ghadimi et al., 2018; Navidi et al., 2023). این امر سبب نابودی بخش عظیمی از زمین‌های کشاورزی شده و از دیدگاه امنیت غذایی، خودکفایی و اشتغال پایدار جامعه‌ی روستایی، پیامدهای بسیاری را در پی داشته است.

یکی از راه‌های ایجاد تعادل میان جمعیت و تولید مواد غذایی پایدار برای رفع نیازهای فزاینده جوامع بشری، اولویت دادن به گسترش فعالیت‌های کشاورزی از طریق افزایش تولیدات این بخش با در نظر گرفتن ملاحظات توسعه‌ی پایدار است. رکن اساسی این امر حفظ اراضی کشاورزی با کاربری‌های زراعی و باغی است. لذا برای درک بهتر موضوع باید ذی‌نفعان این عرصه را شناسایی کرد تا بتوان در مورد رفتار آن‌ها برنامه‌ریزی نمود (Mohammadzadeh et al., 2020).

امروزه پژوهش‌های زیادی در زمینه‌ی عوامل مؤثر بر تغییر کاربری اراضی کشاورزی در داخل و خارج از کشور صورت گرفته است و عوامل متنوعی را به‌عنوان عوامل مؤثر بر تغییر کاربری اراضی معرفی نموده‌اند. به طوری که یزدانپناه (Yazdanpanah, 2021) در پژوهش خود عوامل اقتصادی، اجتماعی، حقوقی و قانونی و توسعه‌ی بی‌رویه‌ی مکانی، بهره‌مند پاسکه و کاووسی کلاشمی (Bahremand Paskeh & Kavooosi Kalashami, 2020)، عوامل حاکمیتی، عامل مشکلات زندگی در روستا، عوامل اقتصادی و محیطی را عوامل اصلی تغییر کاربری می‌دانند. محمد شریفی و همکاران (Mohammad Sharifi, 2020) و شایسته‌مند و همکاران (Shayestemand, 2019) متغیرهای سن، بعد خانوار، مساحت اراضی، تعداد افراد شاغل خانواده در بخش کشاورزی، فاصله‌ی اراضی تا مرکز شهر، اجاره بهای زمین،

بنابراین، با توجه به مطالعات انجام شده عوامل متعددی بر تغییر کاربری اراضی کشاورزی تأثیر گذارند که از آن جمله می‌توان به متغیرهای اقتصادی (گرانی نهاده‌های کشاورزی، پایین بودن قیمت محصولات زراعی و غیره)، اجتماعی (بی‌سوادی، کم سوادی زارعین، عدم تخصص)، قانونی (برخورد ضعیف با قانون شکنان، ضعف نظارت دستگاه‌های دولتی و فساد اداری و باندبازی بین برخی کارکنان) و محیطی (فرسایش خاک، کمبود بارش و خشک سالی‌های اخیر، شکل و اندازه‌ی نامناسب اراضی برای کشاورزی) اشاره نمود.

با وجود مطالعات صورت گرفته در زمینه بررسی عوامل تغییر کاربری اراضی، پژوهش‌های اندکی به صورت جسته و گریخته در این زمینه از دیدگاه متخصصین این حوزه صورت گرفته است. لذا با این دیدگاه در این مطالعه سعی شده به بررسی عوامل مؤثر بر تغییر کاربری اراضی کشاورزی در ایران پرداخته شود که جهت نیل به این هدف پژوهش حاضر تحت عنوان تحلیل عوامل مؤثر بر تغییر کاربری اراضی کشاورزی در ایران با استفاده تکنیک دلفی فازی انجام شد.

روش‌شناسی تحقیق

پژوهش حاضر به لحاظ هدف کاربردی و پارادایم از نوع تحقیقات آمیخته (کیفی - کمی) با رویکرد اکتشافی می‌باشد (Creswell & Clark, 2017) که با هدف شناسایی عوامل مؤثر بر تغییر کاربری اراضی در ایران انجام شده است. جامعه‌ی آماری این تحقیق را ۳۳ نفر از کارشناسان فعال در بخش خاک و آب مراکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان‌های کشور که نماینده مؤسسه تحقیقات خاک و آب در پایش و تعیین قابلیت کشت اراضی کشاورزی می‌باشند، تشکیل می‌دهند؛ که از این میان تعدادی بالغ بر ۱۲ نفر به عنوان نمونه که در زمینه‌ی تغییر کاربری اراضی صاحب‌نظر بودند با استفاده از روش نمونه‌گیری هدفمند و از نوع گلوله‌برفی به عنوان نمونه‌ی آماری انتخاب شدند. به منظور دستیابی به اهداف پیش روی مطالعه‌ی حاضر، ابتدا با استفاده از مصاحبه با

نگرش کشاورزان نسبت به حفظ اراضی کشاورزی، داشتن شغل اصلی کشاورزی و مرغوبیت و حاصلخیزی اراضی و درنهایت متغیرهای سطح تحصیلات و درآمد کل سالانه‌ی کشاورزان، مساحت کل اراضی تحت مالکیت و دیم بودن را از عوامل اصلی تغییر کاربری اراضی گزارش نمودند.

در بررسی‌های بین‌المللی نیز عوامل متعددی ذکر شده‌اند، دلال و همکاران (Dalal, 2000) در پژوهشی که در دانشگاه آکایاما در زمینه‌ی تغییر کاربری اراضی در ژاپن بین سال‌های ۱۹۹۰-۱۹۷۵ انجام دادند، عواملی همچون رقابت بین زمین شهری و زراعی، افزایش فرصت‌های شغلی غیر کشاورزی که به موازات رشد شهرنشینی افزایش یافته را در تغییر کاربری اراضی کشاورزی مؤثر دانستند. لامبین و همکاران (Lambin, 2003)، علل اصلی تغییر کاربری اراضی را کمبود منابع تولید و افزایش فشار بر منابع، تغییر فرصت‌های ایجاد شده توسط بازارها، مداخله‌های سیاست خارجی، کاهش ظرفیت سازگاری و افزایش آسیب‌پذیری، تغییر در سازمان‌های اجتماعی جهت دسترسی به منابع و تغییر نگرش افراد ذکر کرده‌اند. اندرسون و گیسون (Andersson & Gibson, 2007)، سیاست و تصمیمات دولت، ککیر و پرت و (Parent, Chakir & 2009)، نظام‌های نظارتی و همچنین جنس خاک را مهمترین عوامل تغییر کاربری می‌دانند. یوتوگلو و ویلیمز و (Ustaoglu & Williams, 2017) در مطالعه خود تبدیل زمین کشاورزی را ناشی از تعامل پیچیده مداوم بین محیط فیزیکی، تنظیمات سیاست و عوامل اجتماعی-اقتصادی گزارش نمودند.

همچنین مطالعات نشان می‌دهد که در کشورهایی که حکمرانی قوی دارند، رشد اقتصادی بیش‌تر از رشد جمعیت به گسترش زمین شهری کمک می‌کند و رشد جمعیت شهری و گسترش زمین شهری با هم همبستگی دارند، اما این رابطه برای کشورها در مراحل مختلف توسعه متفاوت است. در نهایت، نتایج نشان می‌دهد که حکمرانی خوب شرط لازم برای رشد اقتصادی است تا بر گسترش زمین شهری تأثیر بگذارد (Mahtta et al., 2022).

خبرگان و بررسی‌های جامع کتابخانه‌ای و ارزیابی نتایج مطالعات مرتبط گذشته تعداد بسیاری از شاخص‌های مهم مؤثر بر تغییر کاربری اراضی کشاورزی شناسایی و استخراج شدند و در چهار گروه (اقتصادی، اجتماعی-فرهنگی، قانونی-نهادی، محیطی-زیرساختی) تقسیم‌بندی گردیدند (جدول ۱). سپس با استفاده از شاخص‌های استخراج شده، پرسشنامه‌ی دلفی فازی در قالب طیف لیکرت هفت گزینه‌ای (کاملاً بی‌اهمیت تا کاملاً با اهمیت) و یک سوال باز (Habibi et al., 2014) طراحی گردید. به منظور تأیید روایی صوری، پرسشنامه در اختیار تعدادی از متخصصان موضوعی قرار گرفت و بر اساس نظرات آنان، اصلاحات لازم اعمال گردید و پایایی آن نیز از طریق محاسبه‌ی ضریب آلفای کرونباخ برای بخش‌های مختلف پرسشنامه (بین ۰/۸۱ تا ۰/۹۵) تأیید شد. در گام بعدی نیز به منظور شناسایی و اولویت‌بندی شاخص‌های اساسی در تغییر کاربری اراضی از روش دلفی فازی در چند مرحله تا رسیدن به اجماع نظر خبرگان استفاده گردید. همچنین، در این پژوهش جهت تحلیل داده‌ها از نرم افزار Excel و SPSS استفاده گردید.

رویکرد دلفی فازی

روش دلفی فازی در سال ۱۹۸۸ توسط کافمن و گوپتا ابداع شد (Kaufmann, & Gupta, 1988)، این روش تکامل یافته‌ی روش دلفی سنتی است که با دقت بیش‌تری انعطاف‌پذیری خود را حفظ و داده‌های غیر صریح و غیر دقیق را تحلیل می‌کند. در روش دلفی فازی، داده‌ها به جای اعداد واقعی با اعداد فازی نمایش داده می‌شوند. مراحل اجرای روش دلفی فازی در واقع ترکیبی از اجرای

روش دلفی و انجام تحلیل‌ها روی اطلاعات با استفاده از تعاریف نظریه‌ی مجموعه‌ی فازی است. در این روش، اعداد مثلثی فازی برای ثبت نظرهای کارشناسان به‌کار گرفته می‌شود. دو نقطه پایانی اعداد فازی مثلثی از مقادیر حداکثر و حداقل نظرهای خبرگان تشکیل خواهد شد. از مزایای روش دلفی فازی می‌توان به پاسخ‌های بی‌طرفانه، کاهش تکرار دفعات ارسال پرسشنامه و دریافت بازخورد و تجزیه و تحلیل آماری نظرهای به‌صورت گروهی اشاره کرد، در واقع عدد فازی مثلثی از گنجاندن نظرهای کارشناسی به کار می‌رود (Montazer & Jafari, 2008).

یکی از بزرگترین مزیت‌های تکنیک دلفی فازی نسبت به تکنیک دلفی سنتی، غربال شاخص‌های آن است که می‌توان از یک مرحله برای تلخیص و غربال متغیرها استفاده کرد (Habibi et al., 2014). الگوریتم اجرای تکنیک دلفی فازی شامل گام‌های زیر است (Habibi et al., 2014).

- شناسایی طیف مناسب برای فازی‌سازی عبارات کلامی
 - جمع‌آوری مقادیر فازی شده
 - فازی‌زدایی مقادیر
 - انتخاب شدت آستانه و غربال معیارها
- در الگوریتم اجرای تکنیک دلفی فازی برای غربالگری، نخست باید طیف مناسبی را برای فازی‌سازی عبارات کلامی پاسخ‌دهندگان توسعه داد (جدول ۲). متغیرهای را که ارزش آن‌ها را لغات یا جملات زبان طبیعی یا زبان‌های مصنوعی تشکیل می‌دهند، متغیرهای زبانی نامیده می‌شوند (Qolipour & Mohammadzadeh, 2013).

جدول ۱- شاخص‌های مورد استفاده در تحقیق با توجه به مطالعات پیشین

Table 1- The indicators used in the research according to the studies

اقتصادی	درآمد اندک و نداشتن پشتوانه‌ی مالی (A1)، کم ارزش بودن اراضی روستاها نسبت به شهر (A2)، اشباع بودن بازار تولید محصولات زراعی در منطقه به دلیل گسترش بیش از حد مزارع (A3)، بالا بودن هزینه‌های تولید در مقایسه با درآمد حاصل از کشاورزی (A4)، نبود قیمت تضمینی برای محصولات کشاورزی (A5)، افزایش واردات محصولات کشاورزی (A6)، افزایش اجاره بهای زمین‌های کشاورزی (A7)، کاهش قیمت برخی محصولات کشاورزی (A8)، افزایش قیمت اراضی کشاورزی با تغییر کاربری آن (A9)، نرخ بالای بهره وام بانکی و بدهی کشاورزان به بانک (A10)، تأمین مخارج تحصیل فرزندان (A11)، تقاضا برای اراضی مسکونی، تجاری، گردشگری و صنعتی (A12)، افزایش هزینه‌های زندگی و دشواری معیشت در روستاها (A13)، پایین بودن بهره‌وری سرمایه در بخش کشاورزی (A14)، درآمد بالاتر کاربری‌های دیگر (A15)، رواج مشاغل کاذب و درآمد مطلوب برخی از آن‌ها (گرایش به سمت قاچاق و ...) (A16)، ماشینی شدن کشاورزی (A17)، عدم بیمه‌ی محصولات کشاورزی (A18)، کاهش یا از بین رفتن صادرات محصولات کشاورزی (A19)
اجتماعی_فرهنگی	کهنوت سن کشاورزان و عدم توانایی انجام فعالیت کشاورزی (B1)، داشتن شغل غیر کشاورزی (B2)، علاقه نداشتن به شغل کشاورزی (B3)، اعتقاد به جایگاه نامناسب شغل کشاورزی (B4)، رشد روزافزون جمعیت و صنعتی شدن جوامع بشری (B5)، فقر اطلاعاتی و تحصیلی بهره‌برداران (B6)، به دست آوردن شغل بهتر و مناسبتر (B7)، عدم اهتمام رسانه‌ها به ترویج اهمیت کشاورزی (B8)، تمایل به شهرنشینی کشاورزان و روستاییان (B9)، افزایش تعداد گردشگران و تعداد خانه‌های دوم (B10)، نبود امنیت در روستا (B11)، ثروت طلبی بهره‌برداران (B12)، ناآگاهی از قوانین حفاظتی اراضی (B13)، کاهش نیروی کار کشاورزی (B14)، نداشتن سابقه و تخصص کافی برای فعالیت‌های کشاورزی (B15)، بالا رفتن توقع فرزندان (B16)
قانونی_نهادی	سیاست توسعه روستایی و بهبود شرایط حمل و نقل به روستا (C1)، ضعف نظارت نهادهای دولتی نظیر دهیاری (C2)، ضعف دستگاه‌های اجرایی در اطلاع رسانی به مالکین اراضی کشاورزی درباره نوع کاربری و ممنوعیت تغییر کاربری (C3)، نبود قانون کارآمد در زمینه‌ی تغییر کاربری (C4)، سیاست‌های حمایتی ضعیف دولت از کشاورزی و کشاورزان (C5)، سیستم انتقال ملک بر اساس قول نامه و بدون نظارت رسمی (C6)، ضعف مدیریت اراضی (C7)، عدم همکاری و هماهنگی لازم بین سازمان‌های اجرایی (C8)، عدم اجرای درست قوانین توسط سازمان‌های اجرایی (C9)، عدم برنامه‌ریزی مناسب دولت برای حفظ اراضی کشاورزی (C10)، عدم برخورد قاطع مسئولین با تغییر دهندگان کاربری اراضی (C11)، فساد اداری و باند بازی بین برخی کارکنان (C12)، وابستگی سازمان‌ها و ادارات به درآمد ناشی از تغییر کاربری (C13)، قانون ارث و تقسیم پی در پی اراضی (C14)، حمایت دولت از یکپارچگی اراضی (C15)
محیطی_زیرساختی	کمبود بارش و خشکسالی‌های اخیر (D1)، کاهش کیفیت آب و شوری آن (D2)، تغییرات ناگهانی دما و سرما زدگی (D3)، کاهش حاصلخیزی خاک (D4)، مناسب نبودن وضعیت توپوگرافی اراضی مورد نظر برای فعالیت کشاورزی (ناهمواری اراضی) (D5)، یکپارچه نبودن اراضی کشاورزی (پراکندگی و قطعه قطعه بودن اراضی) (D6)، شکل و اندازه‌ی نامناسب اراضی برای کشاورزی (مانند کوچک بودن اراضی) (D7)، فاصله اراضی تا مراکز شهر (دور بودن اراضی) (D8)، توسعه شهرنشینی در قالب ایجاد باغ شهرها (D9)، نزدیکی اراضی کشاورزی به سکونتگاه‌های روستایی (D10)، قرار گرفتن اراضی کشاورزی در حاشیه‌ی بزرگراه (D11)، توریستی بودن منطقه (D12)، فشار توسعه‌ی شهر (گسترش شهر به سمت روستاهای پیرامونی) (D13)، افزایش ساخت و ساز خانه‌های دوم و ویلاها (D14)، گسترش حمل و نقل و ارتباطات (D15)، مناسب بودن اراضی منطقه برای فعالیت‌های خدماتی (به عنوان مثال: افزایش رستوران‌ها و هتل‌ها و غیره در اطراف) (D16)، توسعه‌ی آزاد راه و جاده‌های اصلی (D17)، ایجاد تاسیسات جدید شهری در مجاورت اراضی کشاورزی (D18)، رها شدن اراضی به دلیل عدم دسترسی به ماشین آلات کشاورزی (بهره‌وری کم) (D19)، عدم دسترسی و سهولت کشاورز برای انتقال محصول به بازارهای مصرف (D20)، مشکل رفت و آمد به روستا (D21)، کمبود امکانات در روستا برای زندگی (D22)

جدول ۲- اعداد فازی مثلثی معادل طیف لیکرت هفت درجه جهت ارزیابی گزینه‌ها

Table 2- Triangular fuzzy numbers equivalent to 7 degree spectrum to evaluate options

کاملاً بی‌اهمیت	خیلی بی‌اهمیت	بی‌اهمیت	متوسط	با اهمیت	خیلی با اهمیت	کاملاً با اهمیت
(0, 0, 0.1)	(0, 0.1, 0.3)	(0.1, 0.3, 0.5)	(0.3, 0.5, 0.7)	(0.5, 0.7, 0.9)	(0.7, 0.9, 1)	(1, 1, 0.9)

(u) بیشینه مقدار عدد فازی، (l) کمینه مقدار عدد فازی و (m) محتمل‌ترین مقدار یک عدد فازی است.

$$F_{AVE} = \frac{\sum l}{n}, \frac{\sum m}{n}, \frac{\sum u}{n} \quad (1)$$

در این پژوهش روش میانگین فازی برای تجمیع دیدگاه خبرگان پیشنهاد شده است که دیدگاه هر کارشناس به صورت عدد فازی (l, m, u) میانگین فازی n عدد فازی به صورت رابطه (۱) محاسبه خواهد شد که در این رابطه

توجه به گزینه‌های پیشنهادی و متغیرهای زبانی تعریف شده در پرسشنامه، نتایج حاصل از بررسی پاسخ‌های ارائه شده در جدول ۳ آمده است.

نظرسنجی مرحله دوم

در مرحله دوم ضمن اعمال تغییرات در شاخص‌ها، پرسشنامه دور دوم تهیه گردید و همراه با نقطه نظرات قبلی هر فرد و میزان اختلاف آن با دیدگاه سایر خبرگان، دوباره به اعضای گروه خبره ارسال گردید. در جدول ۴ نتایج پاسخ‌های ارائه شده و میانگین دیدگاه‌های خبرگان که همانند مرحله‌ی نخست محاسبه شده ارائه گردیده است. با توجه به نتایج میانگین قطعی، خبرگان با اکثر شاخص‌های تأیید شده در مرحله نخست توافق نظر دارند و در این مرحله تنها شاخص‌های افزایش تعداد گردشگران و خانه‌های دوم (B10) و سیستم انتقال ملک بر اساس قول‌نامه و بدون نظارت رسمی (C6)، نتوانستند موافقت اکثر خبرگان را به دست آورند و از دور محاسبات خارج شدند.

پس از تجمیع دیدگاه خبرگان باید به فازی‌زدایی مقادیر به دست آمده پرداخت. روش‌های مختلفی برای فازی‌زدایی وجود دارد. در این پژوهش از رابطه‌ی (۲ و ۳) برای فازی‌زدایی استفاده شد:

$$F_{AVE} = (l, m, u) \quad (2)$$

$$X = \frac{l+2m+u}{4} \quad (3)$$

پس از انتخاب روش مناسب و فازی‌زدایی مقادیر، برای غربال آیت‌ها باید یک آستانه‌ی تحمل در نظر گرفت. آستانه‌ی تحمل را معمولاً ۰/۷ در نظر می‌گیرند. اگر مقدار قطعی حاصل شده بزرگ‌تر از آستانه‌ی تحمل باشد شاخص مورد نظر تأیید شده و در غیر این صورت شاخص مورد نظر حذف می‌گردد (Habibi et al., 2014).

نتایج و بحث

نظرسنجی مرحله نخست

در مرحله نخست، شاخص‌های شناسایی شده در قالب پرسشنامه در اختیار خبرگان قرار گرفت و میزان موافقت آن‌ها با هر کدام از شاخص‌ها اخذ گردید و نقطه نظرات پیشنهادی و اصلاحی آن‌ها جمع‌بندی گردید. با

جدول ۳- میانگین فازی نظرات خبرگان و مقدار قطعی در مرحله اول

Table 3- Fuzzy average of experts' opinions and definitive value in the first stage

نتیجه	مقدار قطعی	میانگین فازی نظرات	عامل	نتیجه	مقدار قطعی	میانگین فازی نظرات	عامل	گروه
رد	0.434	(0 .0.41 .0.9)	A11	رد	0.556	(0 .0.61 .1)	A1	اقتصادی
تأیید	0.717	(0.3 .0.78 .1)	A12	رد	0.548	(0 .0.59 .1)	A2	
رد	0.576	(0.3 .0.55 .0.9)	A13	رد	0.493	(0 .0.53 .0.9)	A3	
تأیید	0.703	(0.3 .0.75 .1)	A14	تأیید	0.707	(0.3 .0.76 .1)	A4	
تأیید	0.821	(0.5 .0.89 .1)	A15	رد	0.508	(0 .0.51 .1)	A5	
رد	0.456	(0 .0.41 .1)	A16	رد	0.450	(0 .0.40 .1)	A6	
رد	0.411	(0 .0.37 .0.9)	A17	رد	0.460	(0.1 .0.42 .0.9)	A7	
رد	0.382	(0 .0.26 .1)	A18	رد	0.470	(0 .0.44 .1)	A8	
رد	0.447	(0 .0.39 .1)	A19	تأیید	0.765	(0.3 .0.88 .1)	A9	
				رد	0.546	(0 .0.59 .1)	A10	
تأیید	0.709	(0.3 .0.76 .1)	B9	رد	0.485	(0.1 .0.47 .0.9)	B1	اجتماعی و فرهنگی
تأیید	0.703	(0.3 .0.75 .1)	B10	رد	0.538	(0 .0.57 .1)	B2	
رد	0.398	(0 .0.27 .1)	B11	رد	0.485	(0 .0.47 .1)	B3	
تأیید	0.731	(0.3 .0.81 .1)	B12	رد	0.471	(0 .0.44 .1)	B4	
رد	0.483	(0 .0.46 .1)	B13	تأیید	0.713	(0.3 .0.77 .1)	B5	
رد	0.471	(0 .0.44 .1)	B14	رد	0.506	(0 .0.51 .1)	B6	
رد	0.423	(0 .0.39 .1)	B15	تأیید	0.703	(0.3 .0.75 .1)	B7	
رد	0.517	(0 .0.53 .1)	B16	رد	0.475	(0 .0.45 .1)	B8	
تأیید	0.717	(0.3 .0.78 .1)	C9	رد	0.479	(0.1 .0.45 .0.9)	C1	قانونی - نهادی
تأیید	0.830	(0.5 .0.91 .1)	C10	رد	0.566	(0.1 .0.58 .1)	C2	
تأیید	0.814	(0.5 .0.87 .1)	C11	تأیید	0.707	(0.3 .0.76 .1)	C3	
تأیید	0.803	(0.5 .0.85 .1)	C12	تأیید	0.721	(0.3 .0.79 .1)	C4	
تأیید	0.805	(0.5 .0.86 .1)	C13	تأیید	0.795	(0.5 .0.84 .1)	C5	
تأیید	0.703	(0.3 .0.75 .1)	C14	تأیید	0.707	(0.3 .0.76 .1)	C6	
رد	0.561	(0.1 .0.57 .1)	C15	تأیید	0.707	(0.3 .0.76 .1)	C7	
				تأیید	0.745	(0.3 .0.84 .1)	C8	
تأیید	0.725	(0.3 .0.80 .1)	D12	تأیید	0.703	(0.3 .0.75 .1)	D1	محیطی - زیرساختی
تأیید	0.735	(0.3 .0.82 .1)	D13	رد	0.543	(0 .0.58 .1)	D2	
تأیید	0.741	(0.3 .0.83 .1)	D14	رد	0.445	(0 .0.39 .1)	D3	
رد	0.565	(0.1 .0.58 .1)	D15	رد	0.481	(0 .0.46 .1)	D4	
تأیید	0.703	(0.3 .0.75 .1)	D16	رد	0.475	(0 .0.45 .1)	D5	
تأیید	0.706	(0.3 .0.76 .1)	D17	رد	0.548	(0 .0.59 .1)	D6	
تأیید	0.703	(0.3 .0.75 .1)	D18	رد	0.567	(0 .0.63 .1)	D7	
رد	0.515	(0 .0.53 .1)	D19	رد	0.427	(0 .0.40 .0.9)	D8	
رد	0.414	(0 .0.32 .1)	D20	تأیید	0.731	(0.3 .0.81 .1)	D9	
رد	0.432	(0 .0.41 .0.9)	D21	رد	0.585	(0 .0.67 .1)	D10	
رد	0.455	(0 .0.41 .1)	D22	رد	0.588	(0.1 .0.62 .1)	D11	

جدول ۴- میانگین فازی نظرات خبرگان و مقدار قطعی در مرحله دوم

Table 4-Fuzzy average of experts' opinions and definitive value in the second stage

گروه	عامل	میانگین فازی نظرات	مقدار قطعی	نتیجه	عامل	میانگین فازی نظرات	مقدار قطعی	نتیجه
اقتصادی	A4	(0.3, 0.77, 1)	0.712	تأیید	A14	(0.3, 0.76, 1)	0.707	تأیید
	A9	(0.3, 0.88, 1)	0.765	تأیید	A15	(0.5, 0.89, 1)	0.821	تأیید
	A12	(0.3, 0.78, 1)	0.717	تأیید				
اجتماعی و فرهنگی	B5	(0.3, 0.78, 1)	0.717	تأیید	B9	(0.3, 0.76, 1)	0.709	تأیید
	B7	(0.3, 0.75, 1)	0.703	تأیید	B12	(0.3, 0.82, 1)	0.735	تأیید
قانونی - نهادی	C3	(0.3, 0.76, 1)	0.707	تأیید	C10	(0.5, 0.91, 1)	0.830	تأیید
	C4	(0.3, 0.79, 1)	0.721	تأیید	C11	(0.5, 0.87, 1)	0.814	تأیید
	C5	(0.5, 0.84, 1)	0.799	تأیید	C12	(0.5, 0.85, 1)	0.803	تأیید
	C7	(0.3, 0.77, 1)	0.713	تأیید	C13	(0.5, 0.87, 1)	0.810	تأیید
	C8	(0.3, 0.84, 1)	0.745	تأیید	C14	(0.3, 0.75, 1)	0.703	تأیید
	C9	(0.3, 0.78, 1)	0.717	تأیید				
محیطی - زیرساختی	D1	(0.3, 0.75, 1)	0.703	تأیید	D14	(0.3, 0.84, 1)	0.745	تأیید
	D9	(0.3, 0.81, 1)	0.731	تأیید	D16	(0.3, 0.75, 1)	0.703	تأیید
	D12	(0.3, 0.80, 1)	0.725	تأیید	D17	(0.3, 0.76, 1)	0.706	تأیید
	D13	(0.3, 0.82, 1)	0.735	تأیید	D18	(0.3, 0.76, 1)	0.707	تأیید

پس از آنکه هر دو مرحله نظرسنجی انجام شد لازم است که اختلاف میانگین فازی زدایی شده عوامل مؤثر بر تغییر کاربری اراضی مورد بررسی قرار گیرد. بررسی اختلاف میانگین فازی زدایی شده عوامل مؤثر بر تغییر کاربری اراضی در جدول ۵ نشان داده شده است. با توجه به دیدگاه‌های ارائه شده در مرحله اول و مقایسه‌ی آن با نتایج مرحله دوم در صورتی که اختلاف بین میانگین فازی- زدایی شده در دو مرحله کمتر از ۰/۱ باشد در این صورت فرایند نظرسنجی متوقف می‌شود. با توجه به اینکه اختلاف میانگین فازی زدایی شده نظر خبرگان در دو مرحله کمتر از ۰/۱ می‌باشد خبرگان در مورد عوامل مؤثر بر تغییر کاربری اراضی به اجماع رسیده‌اند و نظرسنجی در این مرحله متوقف می‌شود.

نتایج حاصل از تحلیل دلفی فازی عوامل مؤثر بر تغییر کاربری اراضی نشان داد که از میان ۷۲ شاخص مورد بررسی ۲۸ شاخص به عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تغییر کاربری اراضی در ایران بر اساس نظرات خبرگان انتخاب شدند.

برای اولویت‌بندی از میانگین فازی زدایی شده‌ی مرحله دوم استفاده شده به گونه‌ای که هر شاخص که میانگین فازی زدایی شده بالاتری داشته باشد در اولویت اول

قرار می‌گیرد (جدول ۶). با توجه به نتایج به دست آمده در بعد اقتصادی، عوامل درآمد بالاتر کاربری‌های دیگر با وزن استاندارد ۰/۲۲۰۵، افزایش قیمت اراضی کشاورزی با تغییر کاربری آن با وزن ۰/۲۰۵۵ و تقاضا برای اراضی مسکونی، تجاری، گردشگری و صنعتی با وزن ۰/۱۹۲۶ در رتبه‌های اول تا سوم قرار گرفتند. در بعد اجتماعی - فرهنگی عواملی همچون ثروت طلبی بهره‌برداران با وزن ۰/۲۵۶۵، رشد روزافزون جمعیت و صنعتی شدن جوامع بشری با وزن ۰/۲۵۰۳ و تمایل به شهرنشینی کشاورزان و روستاییان با وزن ۰/۲۴۷۵ در رتبه‌های اول تا سوم قرار گرفتند. در بعد قانونی - نهادی عواملی همچون عدم برنامه‌ریزی مناسب دولت برای حفظ اراضی کشاورزی با وزن ۰/۰۹۹۲، عدم برخورد قاطع مسئولین با تغییر دهندگان کاربری اراضی با وزن ۰/۰۹۷۳ و وابستگی سازمان‌ها و ادارات به درآمد ناشی از تغییر کاربری با وزن ۰/۰۹۶۸ در رتبه‌های اول تا سوم قرار گرفتند. در بعد محیطی - زیرساختی افزایش ساخت و ساز خانه‌های دوم و ویلاها با وزن ۰/۱۲۹۵، فشار توسعه‌ی شهر (گسترش شهر به سمت روستاهای پیرامونی) با وزن ۰/۱۲۷۷، توسعه‌ی شهرنشینی در قالب ایجاد باغ شهرها با وزن ۰/۱۲۶۹ در رتبه‌های اول تا سوم قرار گرفتند.

جدول ۵- اختلاف میانگین مرحله اول و دوم نظرسنجی

Table 5 - The average difference between the first and second stages of the survey

گروه	عامل	مقدار قطعی مرحله اول	مقدار قطعی مرحله دوم	اختلاف میانگین دو مرحله
اقتصادی	بالا بودن هزینه‌های تولید در مقایسه با درآمد حاصل از کشاورزی	0.707	0.712	0.005
	افزایش قیمت اراضی کشاورزی با تغییر کاربری آن	0.765	0.765	0
	تقاضا برای اراضی مسکونی، تجاری، گردشگری و صنعتی	0.717	0.717	0
	پایین بودن بهره‌وری سرمایه در بخش کشاورزی (به صرفه نبودن کشاورزی)	0.703	0.707	0
	درآمد بالاتر کاربری‌های دیگر	0.821	0.821	0
اجتماعی_ فرهنگی	رشد روزافزون جمعیت و صنعتی شدن جوامع بشری	0.713	0.717	0.004
	به دست آوردن شغل بهتر و مناسبتر	0.703	0.703	0
	تمایل به شهرنشینی کشاورزان و روستاییان	0.709	0.709	0
	ثروت طلبی بهره‌برداران	0.731	0.735	0.004
قانونی_ نهادی	ضعف دستگاه‌های اجرایی (سازمان جهاد کشاورزی، بنیاد مسکن انقلاب اسلامی و غیره) در اطلاع رسانی به مالکین اراضی کشاورزی درباره نوع کاربری و ممنوعیت تغییر کاربری	0.707	0.707	0
	نبود قانون کارآمد در زمینه تغییر کاربری	0.721	0.721	0
	سیاست‌های حمایتی ضعیف دولت از کشاورزی و کشاورزان	0.795	0.799	0.004
	ضعف مدیریت اراضی	0.707	0.713	0.006
	عدم همکاری و هماهنگی لازم بین سازمان‌های اجرایی	0.745	0.745	0
	عدم اجرای درست قوانین توسط سازمان‌های اجرایی	0.717	0.717	0
	عدم برنامه‌ریزی مناسب دولت برای حفظ اراضی کشاورزی	0.830	0.830	0
	عدم برخورد قاطع مسئولین با تغییر دهندگان کاربری اراضی	0.814	0.814	0
	فساد اداری و باند بازی بین برخی کارکنان	0.803	0.803	0
	وابستگی سازمان‌ها و ادارات به درآمد ناشی از تغییر کاربری	0.805	0.810	0.005
	قانون ارث و تقسیم پی در پی اراضی	0.703	0.703	0
	کمبود بارش و خشکسالی‌های اخیر (افت سطح آب‌های زیر زمینی، خشکیدن چاه‌ها و قنات‌ها)	0.703	0.703	0
محیطی_ زیر ساختی	توسعه شهرنشینی در قالب ایجاد باغ شهرها	0.731	0.731	0
	توریستی بودن منطقه	0.725	0.725	0
	فشار توسعه‌ی شهر (گسترش شهر به سمت روستاهای پیرامونی)	0.735	0.7235	0
	افزایش ساخت و ساز خانه‌های دوم و ویلاها	0.741	0.745	0.004
	مناسب بودن اراضی منطقه برای فعالیت‌های خدماتی (به عنوان مثال: افزایش رستوران‌ها و هتل‌ها و غیره در اطراف)	0.703	0.703	0
	توسعه‌ی آزاد راه و جاده‌های اصلی	0.706	0.706	0
	ایجاد تاسیسات جدید شهری در مجاورت اراضی کشاورزی	0.703	0.707	0.004

جدول ۶- اولویت‌بندی شاخص‌های مؤثر بر تغییر کاربری اراضی

Table 6- Prioritization of indicators affecting land use change

رتبه	وزن	مقدار	عامل	گروه
در بعد	استاندارد	قطعی		
4	0.1911	0.712	بالا بودن هزینه‌های تولید در مقایسه با درآمد حاصل از کشاورزی	اقتصادی
2	0.2055	0.765	افزایش قیمت اراضی کشاورزی با تغییر کاربری آن	
3	0.1926	0.717	تقاضا برای اراضی مسکونی، تجاری، گردشگری و صنعتی	
5	0.1900	0.707	پایین بودن بهره‌وری سرمایه در بخش کشاورزی (به صرفه نبودن کشاورزی)	
1	0.2205	0.821	درآمد بالاتر کاربری‌های دیگر	
2	0.2503	0.717	رشد روزافزون جمعیت و صنعتی شدن جوامع بشری	اجتماعی
4	0.2455	0.703	به دست آوردن شغل بهتر و مناسبتر	
3	0.2475	0.709	تمایل به شهرنشینی کشاورزان و روستاییان	
1	0.2565	0.735	ثروت طلبی بهره‌برداران	
10	0.0845	0.707	ضعف دستگاه‌های اجرایی (سازمان جهاد کشاورزی، بنیاد مسکن انقلاب اسلامی و غیره) در اطلاع رسانی به مالکین اراضی کشاورزی درباره نوع کاربری و ممنوعیت تغییر کاربری	قانونی _ نهادی
7	0.0862	0.721	نبود قانون کارآمد در زمینه تغییر کاربری	
5	0.0955	0.799	سیاست‌های حمایتی ضعیف دولت از کشاورزی و کشاورزان	
9	0.0852	0.713	ضعف مدیریت اراضی	
6	0.0891	0.745	عدم همکاری و هماهنگی لازم بین سازمان‌های اجرایی	
8	0.0857	0.717	عدم اجرای درست قوانین توسط سازمان‌های اجرایی	
1	0.0992	0.830	عدم برنامه‌ریزی مناسب دولت برای حفظ اراضی کشاورزی	
2	0.0973	0.814	عدم برخورد قاطع مسئولین با تغییر دهندگان کاربری اراضی	
4	0.0960	0.803	فساد اداری و باند بازی بین برخی کارکنان	
3	0.0968	0.810	وابستگی سازمان‌ها و ادارات به درآمد ناشی از تغییر کاربری	
11	0.0840	0.703	قانون ارث و تقسیم پی در پی اراضی	
8	0.1221	0.703	کمبود بارش و خشکسالی‌های اخیر (افت سطح آب‌های زیر زمینی، خشکیدن چاه‌ها و قنات‌ها)	محیطی _ زیر ساختی
3	0.1269	0.731	توسعه شهرنشینی در قالب ایجاد باغ شهرها	
4	0.1259	0.725	توریستی بودن منطقه	
2	0.1277	0.735	فشار توسعه‌ی شهر (گسترش شهر به سمت روستاهای پیرامونی)	
1	0.1295	0.745	افزایش ساخت و ساز خانه‌های دوم و ویلاها	
7	0.1222	0.703	مناسب بودن اراضی منطقه برای فعالیت‌های خدماتی (به عنوان مثال: افزایش رستوران‌ها و هتل‌ها و غیره در اطراف)	
6	0.1226	0.706	توسعه‌ی آزاد راه و جاده‌های اصلی	
5	0.1228	0.707	ایجاد تاسیسات جدید شهری در مجاورت اراضی کشاورزی	

همچنین، به منظور اولویت‌بندی گروه عوامل مؤثر بر تغییر کاربری اراضی از میانگین مقدار قطعی و وزن استاندارد استفاده شد. با توجه به نتایج به دست آمده و میانگین مقدار قطعی و وزن استاندارد، گروه قانونی _ نهادی حائز اهمیت بیش‌تری است (جدول ۷).

جدول ۷- اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر تغییر کاربری اراضی در ایران

Table 7- Prioritization of factors affecting land use change in Iran

وزن استاندارد	میانگین مقدار قطعی	اولویت بعد	ابعاد
0.1999	0.744	2	اقتصادی
0.2499	0.716	4	اجتماعی _ فرهنگی
0.0908	0.760	1	قانونی _ نهادی
0.1249	0.719	3	محیطی _ زیرساختی

در بعد قانونی_نهادی عواملی همچون عدم برنامه‌ریزی مناسب دولت برای حفظ اراضی کشاورزی، عدم برخورد قاطع مسئولین با تغییردهندگان کاربری اراضی و وابستگی سازمان‌ها و ادارات به درآمد ناشی از تغییر کاربری، ضعف دستگاه‌های اجرایی در اطلاع‌رسانی به مالکین اراضی کشاورزی درباره نوع کاربری و ممنوعیت تغییر کاربری، نبود قانون کارآمد در زمینه تغییر کاربری، سیاست‌های حمایتی ضعیف دولت از کشاورزی و کشاورزان، ضعف مدیریت اراضی، عدم همکاری و هماهنگی لازم بین سازمان‌های اجرایی، عدم اجرای درست قوانین توسط سازمان‌های اجرایی، فساد اداری و باندهازی بین برخی کارکنان، قانون ارث و تقسیم پی‌درپی اراضی بوده است؛ بنابراین، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان اذعان نمود که سازمان‌های متولی در زمینه اجرای قوانین مربوط به تغییر کاربری اراضی کشاورزی ناکارآمد عمل کرده‌اند و نظارت کافی در این زمینه نداشته‌اند؛ بنابراین، از آنجاکه شیوه‌های استفاده از زمین‌ها که خاک هر کشور بوده تأثیر به‌سزایی بر محیط‌زیست و منابع طبیعی دارد، تشکیل گروه‌های نظارتی متشکل از کارشناسان محیط‌زیست، کشاورزی و حقوقی برای بررسی مستمر وضعیت اراضی، برقراری سازوکارهای قانونی جهت پیگیری و برخورد با تغییر کاربری‌های غیرمجاز راهکار مناسبی برای حفظ اراضی کشاورزی است و موجبات توسعه پایدار را فراهم می‌آورد که در این راستا در مطالعات محققانی همچون براتی و همکاران (Barati et al., 2016)، سعدی و عوافی اکمل (Saadi & Awatfi Akmal, 2017)، صدیقی و همکاران (Sedighi et al., 2018)، بهره‌مند پاسکه و کاووسی کلاشمی (Bahremand Paskeh&Kavoosi Kalashami, 2020)، ککیر و پرنه (Chakir& Parent, 2009)، نیز عوامل قانونی - نهادی از عوامل مهم تغییر کاربری اراضی بوده است.

همچنین، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در بعد اقتصادی، عوامل درآمد بالاتر کاربری‌های دیگر، افزایش قیمت اراضی کشاورزی با تغییر کاربری آن و تقاضا برای

اراضی مسکونی، تجاری، گردشگری و صنعتی مهم‌ترین عوامل بودند که با نتایج یافته‌های بهره‌مند پاسکه و کاووسی کلاشمی (Bahremand Paskeh&Kavoosi Kalashami, 2020)، موسوی و یزدانپناه و (Mousavi Mahtta & Yazdanpanah, 2021)، ماهتا و همکاران (et al., 2022)، محمد شریفی و همکاران (Mohammad sharifi et al., 2020) همخوانی دارد؛ بنابراین، به نظر می‌رسد سوددهی پایین در بخش کشاورزی که از دلایل عمده‌ی آن می‌توان به عدم ثبات قیمت محصولات و وجود واسطه‌ها در هنگام فروش محصول اشاره نمود موجب سوق دادن کشاورزان به تغییر اراضی کشاورزی گردیده است که در این زمینه سازمان‌های متولی همچون جهاد کشاورزی می‌توانند با مدیریت الگوی کشت، حذف واسطه‌های غیرمجاز، ارائه قیمت خرید تضمینی به ثبات قیمت کمک نمایند و از تغییر کاربری‌های غیرمجاز اراضی کشاورزی جلوگیری کنند.

در بعد محیطی_زیرساختی عواملی همچون افزایش ساخت‌وساز خانه‌های دوم و ویلاها، فشار توسعه‌ی شهر (گسترش شهر به سمت روستاهای پیرامونی)، توسعه-ی شهرنشینی در قالب ایجاد باغ شهرها، کمبود بارش و خشک‌سالی‌های اخیر، توریستی بودن منطقه، مناسب بودن اراضی منطقه برای فعالیت‌های خدماتی، توسعه‌ی آزاد راه و جاده‌های اصلی، ایجاد تأسیسات جدید شهری در مجاورت اراضی کشاورزی از مهم‌ترین عوامل بودند که در یافته‌های محمد شریفی و همکاران (Mohammad sharifi et al., 2020) و شایسته‌مند و همکاران (Shayestemand et al., 2019)، دلال و همکاران (Dalal et al., 2000)، لامبین و همکاران (Lambin, 2003) نیز به اهمیت این عوامل در تغییر کاربری اراضی اشاره شده است. از این‌رو، با توجه به نتایج می‌توان بیان نمود که در حقیقت با وجود تنوع اقلیمی بالا در ایران، بخش کشاورزی کشور از کمبود دو شاخص کلیدی آب‌و‌خاک حاصلخیز رنج می‌برد که ریشه این کمبودها هم به اقلیم و هم نحوه مدیریت استفاده از منابع مذکور مربوط

می‌شود که در این زمینه راهکارهای مانند تجهیز و نوسازی اراضی و استفاده از شیوه‌های آبیاری نوین می‌تواند تا حدودی مؤثر واقع شود. از طرفی با توجه به آسیب‌پذیر بودن محیط روستا لازم است رشد و گسترش خانه‌های دوم یا ویلای روستایی در چارچوب برنامه‌ریزی و مدیریت درست صورت گیرد تا ضمن تأمین فضای فراغت برای شهرنشینان، بهره‌مندی اقتصادی و اجتماعی روستاییان به‌منزله‌ی جامعه میزبان افزایش یابد و پیامدهای منفی این پدیده از بعد اکولوژیکی به کمترین حد برسد.

همچنین سایر نتایج نشان داد که عوامل اجتماعی همچون رشد روزافزون جمعیت و صنعتی شدن جوامع بشری، به دست آوردن شغل بهتر و مناسب‌تر، تمایل به شهرنشینی کشاورزان و روستاییان، ثروت طلبی بهره‌برداران از عوامل مؤثر بر تغییر کاربری اراضی بوده است که در مطالعات محققانی همچون براتی و همکاران (Barati et al., 2016)، سعدی و عوافی اکمل (Saadi &Awatfi, 2017)، موسوی و یزدانپناه (Akmal, 2017)، دلال و همکاران (Dalal, 2021)، یوستگلو و ویلیامز (Ustaoglu & Williams, 2000)، نیز به آن‌ها اشاره شده است؛ بنابراین، به نظر می‌رسد پایین بودن بهره‌وری در بخش کشاورزی، سختی کار در این بخش و همچنین نبود امکانات مناسب در مناطق روستایی با توجه به سطح توقعات مردم، پایین بودن منزلت اجتماعی شغل کشاورزی از دیدگاه کشاورزان موجب شده آن‌ها رغبتی به فعالیت در این بخش نداشته باشند و کار در این بخش را به لحاظ اجتماعی درخور احترام ندانند و اقدام به تغییر کاربری اراضی نموده باشند که در این زمینه ارائه راهکارهای باهدف افزایش آگاهی عمومی، حمایت از کشاورزی و سنت‌های محلی می‌توانند به کاهش تغییر کاربری اراضی کشاورزی کمک کند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

تغییر کاربری اراضی کشاورزی ناشی از تعامل پیچیده و مداوم بین محیط فیزیکی، تنظیمات سیاست و عوامل اجتماعی-اقتصادی و غیره است. مطالعات موردی

از عوامل تعیین‌کننده تغییر کاربری اراضی کشاورزی به‌طور بالقوه به تجزیه و تحلیل علل اصلی تغییر کاربری اراضی پرداخته‌اند که این می‌تواند به مقامات و سیاست‌گذاران در درک اهمیت نسبی طیف وسیعی از عوامل در تغییر کاربری اراضی کشاورزی مرتبط کمک شایانی نماید. از این‌رو، پژوهش حاضر نیز با هدف تحلیل عوامل مؤثر بر تغییر کاربری اراضی کشاورزی در ایران انجام شد. نتایج پژوهش نشان داد که بر اساس نظرات خبرگان از ۷۲ شاخص استخراج شده ۲۸ شاخص در چهار گروه (اقتصادی، اجتماعی - فرهنگی، قانونی - نهادی، محیطی - زیرساختی) به‌عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تغییر کاربری اراضی کشاورزی در ایران می‌باشند که در این بین عامل قانونی - نهادی حائز اهمیت بیشتری بود و در این بعد عدم برنامه‌ریزی مناسب دولت برای حفظ اراضی کشاورزی با وزن ۰/۰۹۹۲، عدم برخورد قاطع مسئولین با تغییردهندگان کاربری اراضی با وزن ۰/۰۹۷۳ و وابستگی سازمان‌ها و ادارات به درآمد ناشی از تغییر کاربری با وزن ۰/۰۹۶۸ در رتبه‌های اول تا سوم قرار گرفتند؛ بنابراین، به نظر می‌رسد مدیریت این عوامل می‌تواند نقش حائز اهمیتی در مدیریت تغییر کاربری اراضی کشاورزی داشته باشد.

بنابراین، با توجه به نتایج به‌دست آمده پیشنهادهای زیر به‌منظور بهبود وضعیت موجود ارائه می‌گردد:

پیشنهاد می‌شود قوانین سخت‌گیرانه تدوین گردد و قوانین موجود برای پیشگیری از تبدیل هرچه بیشتر اراضی طبیعی و کشاورزی به غیر کشاورزی اصلاح گردد که در این زمینه می‌توان به محدود کردن اعطای مجوز به تغییر کاربری‌هایی که با محیط طبیعی و ملاحظات زیست‌محیطی انطباق دارد اشاره نمود.

سامانه‌های نظارتی برای پیگیری وضعیت اراضی به‌منظور سرعت بخشیدن به شناسایی تغییرات و تخلفات کشاورزی ایجاد شود.

کارشناسان مراکز مربوطه با برگزاری کارگاه‌های توجیهی به صورت حضوری و وبیناری، انتشار نشریات و بروشورهای ترویجی فراهم شود.

از طرفی، به منظور توسعه زیرساخت‌های کشاورزی توصیه می‌شود سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های کشاورزی مانند سامانه‌های آبیاری مدرن، نزدیک‌تر کردن بازارها به کشاورزان و فراهم کردن دسترسی به فناوری‌های نوین صورت گیرد.

همچنین، ترویج گردشگری کشاورزی به عنوان یک منبع درآمدی جانبی برای کشاورزان می‌تواند به حفظ اراضی کشاورزی نیز کمک کند.

افزون بر این، اجرای طرح‌های هدفمند همچون ایجاد الگوی مناسب در استفاده از طبیعت برای گردشگران و مهاجران فصلی می‌تواند برای جلوگیری از ویلاسازی در مناطق روستایی مناسب باشد.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید نویسنده مقاله است.

همچنین پیشنهاد می‌شود اراضی کشاورزی با ارزش شناسایی و ثبت شوند و برنامه‌های حفاظتی برای آن‌ها ایجاد گردد.

ارائه مشوق‌های اقتصادی از جمله اعطای تسهیلات مالی، تخصیص بهینه یارانه‌ها در افزایش تولیدات بخش کشاورزی، خرید تضمینی محصولات و بیمه محصولات کشاورزی و برای حفظ و توسعه فعالیت‌های کشاورزی و جلوگیری از روند تغییر کاربری اراضی صورت گیرد.

از طرفی حرکت در جهت تنوع‌بخشی به منابع درآمدی با اجرای سیاست‌ها و برنامه‌هایی همچون گسترش فعالیت‌های غیرکشاورزی در محیط روستا ریسک درآمدی خانوارهای روستایی را کاهش می‌دهد و از مهاجرت روستاییان به شهرها تا حدودی جلوگیری می‌کند.

پیشنهاد می‌شود دوره‌های آموزشی برای کشاورزان و جوامع محلی در خصوص مزایای حفظ اراضی کشاورزی و تهدیدات تغییر کاربری اراضی برگزار گردد.

همچنین، زمینه‌ی ارتقا سطح اطلاعات عمومی به منظور فرهنگ‌سازی در خصوص ضرورت حفظ کاربری اراضی کشاورزی و آشنایی با پیامدها و زیان‌های تغییر کاربری اراضی کشاورزی برای روستاییان از طریق

References

1. Andersson, K. and Gibson, C.C. 2007. Decentralized governance and environmental change: Local institutional moderation of deforestation in Bolivia. *Journal of Policy Analysis and Management*, 26(1), pp.99-123. <https://doi.org/10.1002/pam.20229>
2. Asimeh, M. and Nooripoor, M. 2021. Analysis of Barriers and Obstacles of Lands Consolidation and Production Cooperatives Formation: the case of Zarghan County. *Cooperation and Agriculture*, 10(38), pp. 43-61. <https://doi.10.22034/ajcoop.2021.126286>
3. Asimeh, M., Nooripoor, M., Azadi, H., Van Eetvelde, V., Sklenička, P. and Witlox, F. 2020. Agricultural land use sustainability in Southwest Iran: Improving land leveling using consolidation plans. *Land Use Policy*, 94, 104555. [Doi: org/10.1016/j.landusepol.2020.104555](https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104555)
4. Bahremand Paskeh, Z. and Kavooosi Kalashami, M. 2020. Identification of Affecting Factors on Agricultural Land Use Change in Belgor Village, Sowmeh Sara County. *Rural Development Strategies*, 7(2), pp.157-170. [doi: 10.22048/rdsj.2020.241518.1861](https://doi.org/10.22048/rdsj.2020.241518.1861)
5. Barati, A. A., Asadi, A., Kalantari, K. and Azadi, H. 2016. Design of Structural Equation and Integrated Causes and Effects Model of Agricultural Land Use Change in Iran According to the Experts' View of Agricultural Land Organization. *Iranian Agricultural Extension and Education Journal*, 12(1), pp. 21-37. [Doi: 20.1001.1.20081758.1395.12.1.2.3](https://doi.org/10.1001.1.20081758.1395.12.1.2.3)

6. Chakir, R. and Parent, O. 2009. Determinants of land use changes: A spatial multinomial probit approach. *Papers in Regional Science*, 88(2), pp.327-345.
<https://doi.org/10.1111/j.1435-5957.2009.00239.x>
7. Creswell, J. W. and Clark, V. L. P. 2017. *Designing and conducting mixed methods research* (3rd, International student ed.). SAGE Publications.
8. Dalal, B., Dent, C.D. and Dubois, O. 2000. Rural planning in developing countries Earth Scan Publications. London, Sterling VA.
9. Ellis, E.C., Kaplan, J.O., Fuller, D.Q., Vavrus, S., Klein Goldewijk, K. and Verburg, P.H., 2013. Used planet: A global history. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(20), pp.7978-7985. **<https://doi.org/10.1073/pnas.1217241110>**
10. Geist, H.J. and Lambin, E.F. 2002. Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation: Tropical forests are disappearing as the result of many pressures, both local and regional, acting in various combinations in different geographical locations. *BioScience*, 52(2), pp.143-150.
[https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0143:PCAUDF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0143:PCAUDF]2.0.CO;2)
11. Ghadimi, S.A., Papzan, A. and Amini, A. 2018. The Investigation of Agricultural Land Use Change Trend and their Effects on Sustainable Development Components (Zayandehrood Basin of Isfahan Province). *Agricultural Extension and Education Research*, 11(3), pp.41-58.
12. Habibi, A., Izdiyar, P. and Serafraz, A. 2014. Fuzzy multi-criteria decision making, Rasht, Ketiba Gil.
Hsueh, S.L., 2013. A fuzzy logic enhanced environmental protection education model for policies decision support in green community development. *The Scientific World Journal*, 2013(1), pp.250374. **<https://doi.org/10.1155/2013/250374>**
13. Kalantari, K. and Abdollahzadeh, G. 2008. Factors affecting agricultural land fragmentation in Iran: a case study of Ramjerd Sub District in Fars Province. *American Journal of Agricultural and Biological Science*, 3(1), pp. 358-363.
Doi: <https://doi.org/10.3844/ajabssp.2008.358.363>
14. Kaufmann, A. M. and Gupta, M. 1988. Fuzzy mathematical models in engineering and management Scienc, New York: Elsevier Science Inc.
15. Lambin, E.F., Geist, H.J. and Lepers, E. 2003. Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. *Annual Review of Environment and Resources*, 28(1), pp.205-241. **<https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.050302.105459>**
16. Liu, X., Xu, Y., Sun, S., Zhao, X., Wu, P. and Wang, Y. 2022. What is the potential to improve food security by restructuring crops in Northwest China. *Journal of Cleaner Production*, 378, pp. 134620. **doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134620**
17. Liu, Y. and Zhou, Y. 2021. Territory spatial planning and national governance system in China. *Land Use Policy*, 102, pp. 105288. **[doi: org/10.1016/j.landusepol.2021.105288](https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105288)**
18. Mahtta, R., Fragkias, M., Güneralp, B., Mahendra, A., Reba, M., Wentz, E.A. and Seto, K.C. 2022. Urban land expansion: the role of population and economic growth for 300+ cities. *Npj Urban Sustainability*, 2(1), p.5. **[10.1038/s42949-022-00048-y](https://doi.org/10.1038/s42949-022-00048-y)**
19. Mehri, A., Salmanmahiny, A., Tabrizi, A.R.M., Mirkarimi, S.H. and Sadoddin, A. 2018. Investigation of likely effects of land use planning on reduction of soil erosion rate in river basins: Case study of the Gharesoo River Basin. *Catena*, 167, pp.116-129.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.04.026>
20. Mohammad sharifi, M., Hayati, B., Pishbahar, E. and Dashti, G. 2020. Factors affecting on agricultural land use change in the Dezful County, *Agricultural Economics Research*, 12(45), pp. 25-45. **[doi:20.1001.1.20086407.1399.12.45.2.2](https://doi.org/10.22001/1.20086407.1399.12.45.2.2)**
21. Mohammadzadeh, L., Ghanian, M., Shadkam, S. and Marzban, A. 2020. Factors Affecting Agricultural Land Use Changes in South Basin of Urmia Lake; Analyzing the Farmers' Behavior, *Iranian Agricultural Extension and Education Journal*, 16(1), pp. 221-234.
Doi: [10.22034/iaeej.2020.203489.1460](https://doi.org/10.22034/iaeej.2020.203489.1460)
22. Montazer, G.A. and Jafari, N. 2008. Application of fuzzy Delphi method in designing tax policy in Iran. *The Economic Research*, 8(1), pp.91-114.

- URL: <http://ecor.modares.ac.ir/article-18-2470-fa.html>**
23. Mousavi, M., Yazdanpanah, M. 2021. Factors Affecting Agricultural Land Use Change in of Bavi County Khuzestan Province, *Land Management Journal*, 9(1), pp. 13-23.
Doi: 10.22092/lmj.2021.122973
 24. Navidi, M., Asadi Rahmani, H., Chatrenour, M., Kharazmi, R., Jamshidi, M., Ziaee Javid, A., MohamadEsmail, Z. and Ebrahimi Meymand, F. 2023. Changes in agricultural land use as a threat to food security. *Journal of Land Management*, 11(2), pp.229-248.
Doi: 10.22092/LMJ.2023.362757.336
 25. Qolipour, M. and Mohammadzadeh, L. 2013. Fuzzy logic for management students, Ati Nagar, Tehran
 26. Qu, Y., Zhang, Y., Wang, S., Shang, R., Zong, H. and Zhan, L. (2023). Coordinated development of land multi-function space: An analytical framework for matching the supply of resources and environment with the use of land space for ecological protection, agricultural production and urban construction. *Journal of Geographical Sciences*, 33(2), pp. 311-339. **doi.org/10.1007/s11442-023-2084-z**
 27. Saadi, H. A. and Awatfi Akmal, F. 2017. Factors affecting agricultural land use change in the villages of Hamadan city. *Spatial Economy and Rural Development*, 7 (2), pp. 226-211.
 28. Salehi Talshi, F. and Mehboobi, M. 2011. Factors affecting the change of agricultural land use to garden. The first national conference on strategies to achieve sustainable development (Agriculture, Natural Resources and Environment), Tehran.
 29. Schirpke, U., Tasser, E., Borsky, S., Braun, M., Eitzinger, J., Gaube, V., Getzner, M., Glatzel, S., Gschwantner, T., Kirchner, M. and Leitinger, G. 2023. Past and future impacts of land-use changes on ecosystem services in Austria. *Journal of Environmental Management*, 345, pp.118728. **<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118728>**
 30. Sedighi, S., Darban Astane, A. and Rezvani, M. R. 2018. An Investigation of the physical and political Factors Affecting Land Use Changing of Mahmoudabad Town, *Spatial Planning*, 7(2), pp. 39-58. **doi: 10.22108/sppl.2018.81442.0**
 31. Shayestemand, M., Hayati, B. and Haghjou, M. 2019. Factors affecting the agricultural lands use change in Tabriz County, *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 29(1), pp. 237-249.
 32. Song, X.-P., Hansen, M.C., Stehman, S.V., Potapov, P.V., Tyukavina, A., Vermote, E.F. and Townshend, J.R. 2018. Global land change from 1982 to 2016. *Nature* 560, 639–643. **doi: 10.1038/s41586-018-0573-5**
 33. Ustaoglu, E. and Williams, B. 2017. Determinants of urban expansion and agricultural land conversion in 25 EU countries. *Environmental Management*, 60, pp.717-746. **doi: 10.1007/s00267-017-0908-2**
 34. Voinov, A., D. Arctur, I. Zaslavskiy. and Saleem. A. 2008. Community-based software tools to support participatory modeling: a vision. International Congress on Environmental Modeling and Software. IEMSs: 766-774.
 35. Wang, J., Bretz, M., Dewan, M. A. A. and Delavar, M. A. 2022. Machine learning in modelling land-use and land cover-change (LULCC): Current status, challenges and prospects. *Science of the Total Environment*, 822, pp. 153559.
doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153559
 36. Xie, S., Zhang, W., Zhao, Y. and Tong, D. 2022. Extracting land use change patterns of rural town settlements with sequence alignment method. *Land*, 11(2), pp.313.
<https://doi.org/10.3390/land11020313>

تأثیر بیوچار و فسفر بر برخی خصوصیات زراعی گیاه کلزا و کارایی مصرف آب در یک خاک لوم قلیایی

سهیل سلیمی ترازوج، عادل ریحانی تبار*  و نصرت‌اله نجفی

کارشناسی ارشد علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. soheilsalimi70@yahoo.com

استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. areyhani@tabrizu.ac.ir

استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. nanajafi@yahoo.com

دریافت: آبان ۱۴۰۳ و پذیرش: اسفند ۱۴۰۳

چکیده

این تحقیق با هدف بررسی تأثیر برهمکنش کود فسفر و بیوچار حاصل از کاه گندم پیرولیز شده در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس بر برخی خصوصیات زراعی و مورفولوژیکی گیاه کلزا (*Brassica napus* L.) رقم هایولا ۳۰۸ در یک خاک لوم قلیایی در شرایط گلخانه‌ای انجام شد. این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. فاکتورهای آزمایش شامل ماده آلی در پنج سطح (صفر، ۲۰ و ۴۰ گرم بر کیلوگرم خاک از دو منبع کاه گندم و بیوچار حاصل از آن) و فسفر در سه سطح (صفر، ۲۰ و ۴۰ میلی گرم فسفر بر کیلوگرم خاک از منبع سوپرفسفات تریپل) بودند. قبل از برداشت گیاهان شاخص کلروفیل و سطح برگ اندازه‌گیری شدند. بعد از برداشت گیاه نیز ماده خشک شاخساره، ریشه و دانه، کارایی مصرف آب، ارتفاع گیاه، قطر ساقه، حجم ریشه، تعداد غلاف، وزن هزار دانه، مقدار روغن دانه، غلظت و مقدار پروتئین دانه اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که مصرف بیوچار (در هر دو سطح دو و چهار درصد) و فسفر شاخص کلروفیل برگ، ارتفاع گیاه، ماده خشک شاخساره، ریشه و دانه، تعداد غلاف، وزن هزار دانه، کارایی مصرف آب، مقدار پروتئین و روغن دانه را نسبت به شاهد به طور معناداری افزایش داد، اما مصرف کاه گندم سبب کاهش این خصوصیات به جزء کارایی مصرف آب شد. تبدیل کاه گندم به بیوچار پیرولیز شده در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس و مصرف آن در یک خاک لوم قلیایی نسبت به کاه گندم باعث بهبود خصوصیات رشد و مورفولوژیکی گیاه کلزا شد.

واژه‌های کلیدی: بیوچار، کود فسفر، کاه گندم، کلزا

* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: areyhani@tabrizu.ac.ir

نوع مقاله: پژوهشی



مقدمه

کمبود فسفر در دسترس در خاک دومین مشکل عمده حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاهان در سراسر دنیا است (Lindsay & Chien., 1989). کشاورزی مدرن وابسته به کودهای فسفوری است و این عنصر پرمصرف به-همراه نیتروژن ساختار اصلی گیاهان را تشکیل می‌دهد. فسفر در ساختمان درشت مولکول‌ها شرکت داشته و حدود ۰/۲ درصد وزن خشک گیاهان را تشکیل می‌دهد (Anderson et al., 2011). فسفر به‌عنوان یک عنصر ضروری پرمصرف برای گیاهان شناخته شده است. اما کمیت منابع سنگ فسفات، اصلی‌ترین ذخایر طبیعی فسفر در کره زمین، محدود بوده و کیفیت سنگ فسفات استخراجی نیز روند نزولی دارد (Egle et al., 2014). فسفر در رشد و توسعه اندام‌های زایشی گیاهان دخیل است. تغذیه کافی فسفر، بسیاری از جنبه‌های فیزیولوژیک گیاه از قبیل فرایندهای اساسی فتوسنتز، تثبیت نیتروژن، گلدهی، میوه‌دهی و رسیدگی محصول را تشدید می‌کند. فسفر، رشد ریشه مخصوصاً ریشه‌های جانبی را افزایش می‌دهد. در غلات، تغذیه بهینه فسفر سبب قوی‌تر شدن بافت‌های ساختمانی برگ‌ها و ساقه‌ها شده و به جلوگیری از ایجاد ورس کمک می‌کند (Havlin et al., 2019). مطالعات متعددی در مناطق خشک و نیمه‌خشک نشان داده-اند که مصرف کود فسفر، بازده مصرف آب را در گیاهان متعدد و تحمل به خشکی را در شرایط تنش کمبود افزایش می‌دهد (Singh & Sale., 2000). احتمالاً فسفر سبب رشد ریشه و افزایش حجم ریشه‌ها شده و در نتیجه آب قابل استفاده بیشتری برای گیاه وجود خواهد داشت. همچنین این امکان وجود دارد که فسفر به‌دلیل نقش آن در ذخیره‌سازی انرژی و تشکیل پروتئین‌ها، گیاه را به خشکی متحمل کند (Singh & Sale., 2000). کمبود فسفر قابل‌جذب گیاه در خاک عملکرد محصول را محدود می‌کند. برای مقابله با کمبود فسفر سالانه حدود ۱۵ میلیون تن کود فسفر در سطح جهان در زمین‌های کشاورزی مصرف می‌شود (Wang et al., 2012). باین‌حال، تنها پنج

تا ۳۰ درصد از فسفر مصرف‌شده توسط گیاه در سال بعد استفاده می‌شود (Price., 2006). تثبیت فسفر در زمین‌های کشاورزی و میزان بازیافت کم باعث شده است که حدود ۸۰ درصد از منابع سنگ فسفات جهان، در حال حاضر در صنعت تولید کود استفاده شود، اما مطالعات نشان داده‌اند که ذخایر سنگ فسفات جهان طی ۱۰۰ سال آینده تمام خواهند شد (Shu et al., 2006). جستجو برای یک جایگزین مناسب برای سنگ فسفات به‌عنوان یک ماده خام اولیه برای کود فسفر موضوعی مهم در بحث‌های اخیر درباره تولید جهانی عناصر غذایی است. استفاده از ضایعات کشاورزی غنی از فسفر می‌تواند از بسته شدن چرخه ژئوشیمیایی فسفر و حفاظت از سنگ فسفات باقیمانده جلوگیری کند (Frišták & Soja., 2015).

بیوجار مواد غنی از کربن تولید شده از هر گونه مواد آلی طی فرایند پیرولیز در نبود یا غلظت پایین اکسیژن ولی در دمای ۲۵۰ تا ۷۰۰ درجه سلسیوس است (Lehmann et al., 2006). بیوجار می‌تواند به‌عنوان یک منبع ارزشمند فسفر عمل کند (Wang et al., 2014). بیوجار مشابه یک کود فسفر در خاک بوده و بخشی از فسفر بیوجار برای گیاه قابل جذب است. این اثر به عرضه مستقیم فسفر در شکل‌های قابل جذب، به تغییرات pH خاک و یا افزایش فعالیت میکروبی و بهبود تهویه توسط بیوجار نسبت داده می‌شود که برآیند این فرایندها ممکن است منجر به جذب بهتر فسفر توسط گیاهان شود (Atkinson et al., 2010). در یک خاک اسیدی، بیوجار با دو سازوکار قابلیت جذب فسفر در خاک را افزایش می‌دهد: اول به‌دلیل آزادسازی فسفر و دوم افزایش pH و به‌تبع آن کاهش غلظت آلومینیم محلول در خاک‌های اسیدی که نتیجه آن افزایش قابلیت جذب فسفر خاک است (Guo et al., 2014). در یک پژوهش با بررسی تأثیر افزودن بیوجار حاصل از چوب درخت زیتون و کاه گندم به همراه سطوح مختلف کود معدنی بر خصوصیات خاک و رشد گندم (*Triticum durum* L.) گزارش شد که افزودن سطوح ۰/۵، ۱ و ۲/۵ درصد وزنی بیوجار باعث افزایش عملکرد

رشد و عملکرد گیاه دانه روغنی آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.) گردید (Takaragawa et al., 2017).

دانه‌های روغنی پس از غلات، دومین منبع غذایی جهان محسوب می‌شوند. این محصولات علاوه بر دارا بودن ذخایر غنی اسیدهای چرب، حاوی پروتئین نیز می‌باشند. کلزا به عنوان یکی از مهم‌ترین گیاهان دانه روغنی در سطح جهان مطرح است؛ به طوری که پس از سویا و نخل روغنی سومین منبع تولید روغن نباتی جهان به شمار می‌رود. این گیاه روغنی به طور متوسط حاوی ۴۵-۴۰ درصد روغن در دانه است که با توجه به نیاز روزافزون به روغن‌های نباتی و وابستگی کشور به این مواد، لازم است توجه ویژه‌ای به توسعه و گسترش کشت دانه‌های روغنی به ویژه کلزا مبذول گردد. سیاوش و همکاران (Siavash, 2005 et al) در گیاه کلزا به این نتیجه رسیدند که کمبود فسفر سبب کاهش رشد گیاه، کاهش ارتفاع گیاه، تعداد خورجین‌ها و اندازه دانه شد و در کمبود شدید فسفر، رشد رویشی بسیار کند بود و اندام‌های زایشی نیز تشکیل نشدند.

هدف از انجام این پژوهش، اندازه‌گیری تأثیر بیوپچار، این ماده آلی نوظهور و مهم در ترسیب کربن و دوستدار محیط‌زیست و منبع عناصر غذایی و برهمکنش آن با عنصر پرمصرف فسفر بر برخی خصوصیات زراعی گیاه کلزا و کارایی مصرف آب در یک خاک لوم قلیایی بود که در کشور ما تا زمان انجام این تحقیق مطالعات منتشر شده محدود بودند.

مواد و روش‌ها

خاک مورد مطالعه در این تحقیق از عمق ۳۰-۰ سانتی متری یک مزرعه در ایستگاه تحقیقاتی کرکج دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز به صورت مرکب تهیه شد که پس از هوا خشک کردن، کوبیده و از الک دو میلی متری عبور داده شد. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مانند بافت خاک به روش هیدرومتری چهار زمانه (Gee & Bauder, 1986)، کربن آلی به روش اکسایش تر (Nelson &

دانه گندم در حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد نسبت به کود معدنی شد. هر دو بیوپچار به عنوان منبع فسفر قابل جذب برای گیاه عمل کردند که این امر سبب تأثیرات مثبتی بر تولید محصول شده بود (Albuquerque et al., 2014). گزارش شده است که افزودن بیوپچار به خاک باعث افزایش کربن آلی محلول، فسفر قابل دسترس، جوانه زنی بذر، ماده خشک گیاه و کاهش غلظت نیترات خاک گردید که این تغییرات بسته به نوع و مقدار بیوپچار متفاوت بودند (Albuquerque et al., 2014). در تحقیقی تأثیر ۱۰ تن در هکتار بیوپچار (پوسته برنج، کود مرغی، کود دامی، چوب) بر عملکرد گیاه نخود (*Pisum sativum* L.) بررسی و گزارش شد که بیوپچار حاصل از پوسته برنج نسبت به بقیه بیوپچارها بر برخی صفات فیزیولوژیکی مانند تعداد غلاف در گیاه، تعداد دانه در غلاف، تعداد غلاف در بوته و وزن تر شاخساره تأثیر معناداری داشت (Bhattarai et al., 2015). تأثیر بیوپچار (۰، ۲۵، و ۵۰ تن در هکتار) همراه با کم‌آبیاری^۱ (۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد، تبخیر و تعرق مرجع) بر برخی خصوصیات فیزیولوژیکی گوجه‌فرنگی و کارایی مصرف آب آبیاری^۲ مطالعه و گزارش شد که بیوپچار (۲۵، و ۵۰ تن در هکتار) باعث بهبود ذخیره آب خاک در هر دو سطح کم‌آبیاری (۵۰ و ۷۵ درصد) و باعث افزایش رشد و عملکرد گیاه گوجه‌فرنگی در مقایسه با شاهد شد (Agbna et al., 2017). استفاده از بیوپچار به میزان یک تا پنج درصد باعث افزایش رشد و برخی خصوصیات زراعی گیاه ذرت از جمله افزایش ارتفاع، قطر ساقه، غلظت کلروفیل و میزان فتوسنتز و در نتیجه عملکرد دانه و کاه شد (Sun et al., 2017). نتایج مطالعه تأثیر بیوپچار چوب جنگلی (۰، ۲/۵، ۳/۷۵، ۵ و ۶/۲۵ تن در هکتار) بر خصوصیات خاک و عملکرد خیار (*Cucumis sativus* L.) نشان داد که کاربرد بیوپچار به طور معناداری باعث افزایش تعداد میوه، طول میوه و عملکرد خیار نسبت به شاهد شد (Mbah et al., 2017). گزارش شده است که بیوپچار حاصل از کاه آفتابگردان و نیشکر باعث افزایش

قابل جذب با استفاده از عصاره گیر استات آمونیوم (Jones., 2001)، pH در گل اشباع (Rhoades., 1996) و قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع (Thomas., 1996) تعیین شدند (جدول ۱).

(Sommers., 1983)، غلظت قابل جذب عناصر غذایی کم مصرف کاتیونی (آهن، روی، مس و منگنز) به روش DTPA (Lindsay & Norvell., 1978)، نیتروژن کل به روش میکروکجلدال (Jones., 2001)، فسفر قابل جذب به روش اولسن (Olsen & Sommers., 1982)، پتاسیم

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در این تحقیق

Table 1- Some physical and chemical characteristics of the soil used in this research

بافت خاک	شن	سیلت	رس	کربن آلی	کربنات کلسیم	رطوبت ظرفیت	اسیدیته فعال	قابلیت هدایت
Textural class	Sand	Silt	Clay	OC	معادل	مزرعه	pH	الکتریکی
					CaCO _{3eq}	FC		EC (dS m ⁻¹)
					(%)			
Loam	46.1	39.3	14.5	1.1	13.35	19	7.7	0.69

ادامه جدول ۱

Continuation of Table 1

نیتروژن	فسفر	پتاسیم	آهن	روی	مس	منگنز
N	P	K	Fe	Zn	Cu	Mn
(g 100g ⁻¹)				(mg kg ⁻¹)		
0.13	4.8	290.6	1.7	1.5	0.6	4.5

شهری شستشو و در داخل آب مقطر قرار داده شد و به-منظور همگن سازی نمونه ها پس از خشک شدن به وسیله آسیاب خرد و از الک یک میلی متری عبور داده شد. برخی از ویژگی های کاه گندم در جدول ۲ آمده است.

در این تحقیق کاه گندم از ایستگاه تحقیقاتی خلعت پوشان دانشگاه تبریز تهیه و به آزمایشگاه انتقال داده شد. سپس برای حذف مواد زائد و گردوخاک، ابتدا با آب

جدول ۲- برخی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی کاه گندم مورد استفاده در این تحقیق

Table 2- Some physical and chemical characteristics of the straw used in this research

خاکستر	کربن	هیدروژن	نیتروژن	فسفر	پتاسیم	کربن به نیتروژن	اسیدیته	قابلیت هدایت
Ash	C	H	N	P	K	C/N	pH _(1:10)	الکتریکی
								EC _(1:10)
								(dS m ⁻¹)
16.65	39.70	6.26	0.6	0.79	2.66	66.16	7.56	0.681

کوره تزریق شد و شرایط برای انجام فرایند پیرولیز فراهم شد. سپس مواد اولیه بعد از حصول دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس (با سرعت انتقال گرمای ۱۰ درجه سلسیوس در هر دقیقه) به مدت یک ساعت نگهداری شد. پس از رساندن دمای کوره حاوی بیوچار به طور تدریجی به دمای اتاق، بیوچار تولیدی از کوره خارج و از الک یک میلی متری عبور داده شد. برخی از ویژگی های فیزیکی و شیمیایی کاه گندم و بیوچار حاصل از آن از جمله مقدار کل عناصر کربن، هیدروژن و نیتروژن با استفاده از دستگاه CHN Elemental Analyzer (Carlo-Erba NA-1500)

همان طور که در جدول ۲ مشاهده می شود مطابق انتظار کاه گندم مورد استفاده تقریباً ۴۰ درصد کربن داشت و نسبت کربن به نیتروژن هم ۶۶ و خیلی بالاتر از عدد ۳۰ بود که معمولاً در مطالعات غیرمتحرک شدن ازت بومی خاک حائز اهمیت است.

برای تولید بیوچار، ابتدا مواد اولیه در دمای ۶۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت آون خشک شدند (Dong et al., 2011). سپس نمونه ها در داخل کوره قرار داده شده و درب آن کاملاً بسته شد تا از ورود اکسیژن جلوگیری شود. گاز آرگون با دبی پنج لیتر بر دقیقه به داخل

کلزا بهاره رقم هایولا ۳۰۸ در هر گلدان حاوی سه کیلوگرم خاک کشت شدند. بعد از سبز شدن و اطمینان از استقرار آن‌ها، تعداد بوته‌ها در هر گلدان به سه عدد کاهش یافت. رطوبت خاک در طول این دوره در دامنه رطوبتی بین ۸۰ تا ۱۰۰ درصد FC به روش وزنی در دمای 25 ± 5 درجه سلسیوس نگه‌داشته شد. در طول دوره رشد، شاخص کلروفیل برگ با استفاده از دستگاه کلروفیل‌سنج (Hansatech، مدل CL-01) و سطح برگ با استفاده از دستگاه^۳ (LAM، مدل LI-3100C) ساخت کشور آمریکا قبل از برداشت گیاه اندازه‌گیری شدند. بعد از سه ماه، ماده خشک شاخساره، ریشه و دانه با استفاده از ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری شدند. کارایی مصرف آب با استفاده از مقادیر آب مصرفی در طول زمان رشد گیاه و از تقسیم وزن دانه تولیدشده در گلدان بر مقدار آب مصرفی اندازه‌گیری شد. البته لازم به ذکر است که گلدان‌های مورد استفاده فاقد سوراخ زهکشی بوده و لذا تلفات خروج آب مایع از ته گلدان وجود نداشت. در هر گلدان، ارتفاع گیاه با خط کش، قطر ساقه با کونیس و حجم ریشه از طریق غوطه‌ور کردن در درون استوانه ۱۰۰۰ میلی‌لیتری که دارای حجم مشخص آب بود اندازه‌گیری شد. همچنین تعداد غلاف و وزن هزار دانه گیاهان نیز در هر گلدان اندازه‌گیری شدند. همچنین، مقدار روغن دانه به روش سوکسله^۴ و از حاصل ضرب درصد روغن در ماده خشک دانه، غلظت (درصد) پروتئین دانه از حاصل ضرب درصد نیتروژن در ۶/۲۵ (ضریب تبدیل نیتروژن به پروتئین در گیاه کلزا) و مقدار پروتئین دانه از حاصل ضرب درصد پروتئین دانه در ماده خشک دانه تعیین گردید. تجزیه واریانس با نرم‌افزار MSTATC و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. ترسیم شکل‌ها با نرم‌افزار Excel انجام گردید.

ساخت کشور آلمان، قابلیت هدایت الکتریکی و pH در نسبت ۱:۱۰ کاه و بیوپچار به آب (Song & Guo., 2012) ، فسفر و پتاسیم کل به روش هضم در اسید (اسید کلریدریک و اسید نیتریک) (Jones., 2001; Olsen & Sommers., 1982) ، درصد خاکستر کاه گندم و بیوپچار و عملکرد بیوپچار بر طبق (Song & Guo., 2012) تعیین شدند (جدول ۳). این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. فاکتورهای آزمایش شامل ماده آلی از دو منبع (بیوپچار و کاه گندم) و در سه سطح (صفر، ۲۰ و ۴۰ گرم بر کیلوگرم خاک) و فسفر در سه سطح (صفر، ۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک از منبع سوپرفسفات تریپل) بودند. به خاک با کلاس بافتی لوم، سطوح کاه گندم و بیوپچار به همراه ۵۰ میلی‌گرم نیتروژن بر کیلوگرم خاک از منبع اوره افزوده شد و به مدت ۳۰ روز در دامنه رطوبتی بین ۸۰ تا ۱۰۰ درصد FC و در دمای 25 ± 5 درجه سلسیوس در شرایط گلخانه نگهداری شد تا کاملاً مواد آلی مصرفی با خاک مخلوط شود. بر اساس نتایج آزمون خاک (جدول ۱) و توصیه‌های رایج کودی، مقدار ۱۰ میلی‌گرم آهن بر کیلوگرم خاک از منبع سکوسترین آهن (FeEDDHA)، پنج میلی‌گرم مس بر کیلوگرم خاک از منبع سولفات مس ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) با در نظر گرفتن وزن خاک هر گلدان (سه کیلوگرم خاک) به صورت محلول موقع کشت مصرف شد. البته کود فسفر در سه سطح (صفر، ۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک از منبع سوپرفسفات تریپل) هم‌زمان با کاشت بذور استفاده شد. در این تحقیق کود نیتروژن در پنج نوبت و در هر نوبت ۵۰ میلی‌گرم نیتروژن بر کیلوگرم خاک از منبع اوره، به دلیل نیاز فراوان گیاه کلزا به کود نیتروژن و کمبود شدید ماده آلی و نیتروژن کل خاک (جدول ۱) در طول دوره رشد مصرف گردید. تعداد هشت بذر جوانه‌دار شده

جدول ۳- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوچار مورد استفاده در این تحقیق

Table 3- Some physical and chemical characteristics of the biochar used in this research

عملکرد	خاکستر	کربن	هیدروژن	نیتروژن	فسفر	پتاسیم	C/N	pH(1:10)	EC(1:10) (dS m ⁻¹)
yield	Ash	C	H	N	P	K			
		(g 100g ⁻¹)			(g kg ⁻¹)				
37.42	22.7	47.73	2.2	0.68	1.18	40.65	70.2	6.31	4.48

از نسبت مولی هیدروژن به کربن معمولاً به عنوان معیاری برای مقدار نسبی کربن آلیفاتیک و آروماتیک استفاده می‌کنند. نسبت مولی هیدروژن به کربن در کاه مورد استفاده ۱/۸۹ بود (جدول ۲)؛ اما این نسبت در بیوچار به عدد ۰/۵۵ رسید که مطابق استانداردهای جهانی از جمله انجمن جهانی بیوچار (IBI) و انجمن بیوچار اروپا باید کمتر از ۰/۷ باشد که در این مورد کمتر بود و نشان می‌دهد که ماده تولیدی در این تحقیق شامل تعریف بیوچار بود. البته افزایش این نسبت از کاه به بیوچار نشان‌دهنده افزایش ترکیبات آروماتیک است (Reyhanitabar et al., 2020).

نتایج و بحث

برخی ویژگی‌های خاک مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است. همانند اکثر خاک‌های ایران کمبود ماده آلی مشهود است (Shahbazi, and Besharati, 2013). سطح بحرانی فسفر برای خاک‌های آهکی ایران حدود ۱۲ تا ۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم تعیین شده است و خاک مورد استفاده دچار کمبود فسفر قابل جذب بود که برای تحقیق حاضر باید چنین خاکی انتخاب می‌شد. از نظر آهن (سطح بحرانی ۴/۵ تا ۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و مس (۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) نیز کمتر از سطح بحرانی بود ولی از نظر روی

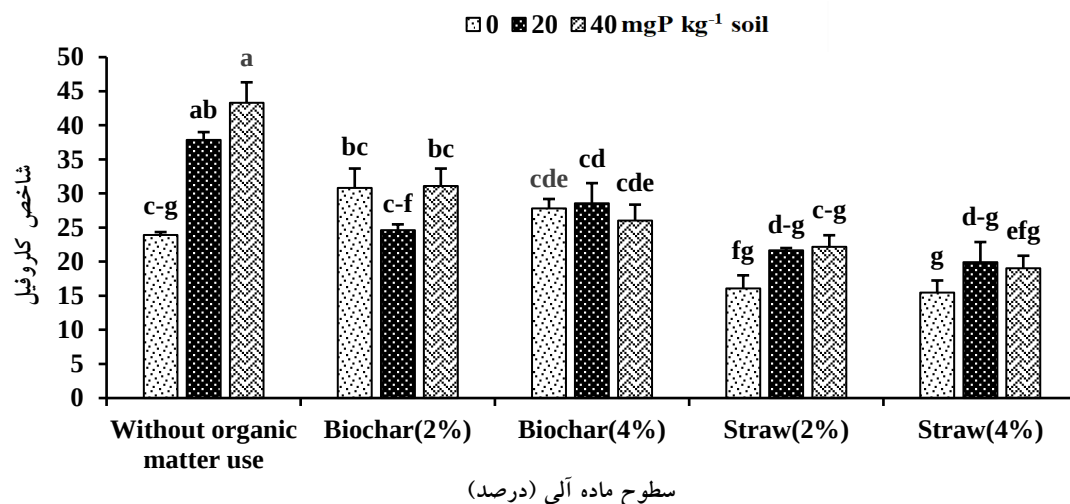
(سطح بحرانی یک میلی‌گرم بر کیلوگرم) و پتاسیم قابل جذب (۲۰۰ تا ۲۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بالاتر از سطح بحرانی بود (Shahbazi, and Besharati, 2013). همچنین، مشکل شوری (قابلیت هدایت الکتریکی بیشتر از چهار دسی زیمنس بر متر) در خاک مورد استفاده در این تحقیق مطرح نبود. برخی ویژگی‌های کاه و بیوچار مورد استفاده در این پژوهش در جدول‌های ۲ و ۳ آمده است. بیوچار سرشار از گروه‌های عاملی اسیدی همچون هیدروکسیدهای آهن و آلومینیم و عامل‌های آلی همچون اسیدهای فنولی بوده و اگر فلزات قلیایی و قلیایی خاکی در مقادیر متناهی وجود نداشته باشند انتظار بر آن است که pH آن اسیدی باشد (Singh et al., 2017). واکنش بیوچار تولید شده در این تحقیق اسیدی ضعیف بود که البته در خاک‌های آهکی امتیاز مثبتی می‌باشد (جدول ۳). به دلیل حضور فلزات قلیایی در بیوچار قابلیت هدایت الکتریکی بیوچار نسبتاً زیاد بود. از نظر شکل قابل دسترس عناصر نیز بیوچار مورد استفاده دارای مقادیر متناهی فسفر بود که می‌تواند باعث بهبود رشد گیاه شود. البته بر اثر حرارت دادن زیست‌توده اولیه مقادیری آمونیوم و نیترات هم در بیوچار تولید می‌شود که به عنوان نیتروژن قابل دسترس بیوچار شناخته می‌شود (Lehmann & Joseph., 2015).

جدول ۴- تجزیه واریانس تأثیر سطوح ماده آلی و فسفر بر شاخص کلروفیل، ماده خشک شاخساره، ارتفاع گیاه، قطر ساقه و سطح برگ

Table 4- Analysis variance of the effect of organic matter and phosphorus levels on chlorophyll index, shoot dry matter, plant height, and stem diameter and leaf area

میانگین مربعات						
منابع تغییر	درجه آزادی	شاخص کلروفیل	ماده خشک شاخساره	ارتفاع گیاه	قطر ساقه	سطح برگ
ماده آلی	4	427.539**	718.884**	1312.049**	0.065**	1718.3**
فسفر	2	118.513**	380.785**	1543.043**	0.042**	442.8**
ماده آلی × فسفر	8	69.573**	38.379**	438.052**	0.010**	110.9**
خطا	30	22.126	2.463	116.809	0.001	23.50
ضریب تغییرات (درصد)		18.16	6.13	11.96	6.06	9.97

** منادار در سطح احتمال یک درصد



شکل ۱- مقایسه میانگین‌های شاخص کلروفیل (SPAD) برگ کلزا برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر
Figure 1- Comparison of rapeseed chlorophyll index averages for the interaction effect of organic matter and phosphorus

شاخص کلروفیل

تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و اثر متقابل آن‌ها بر شاخص کلروفیل در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۴).

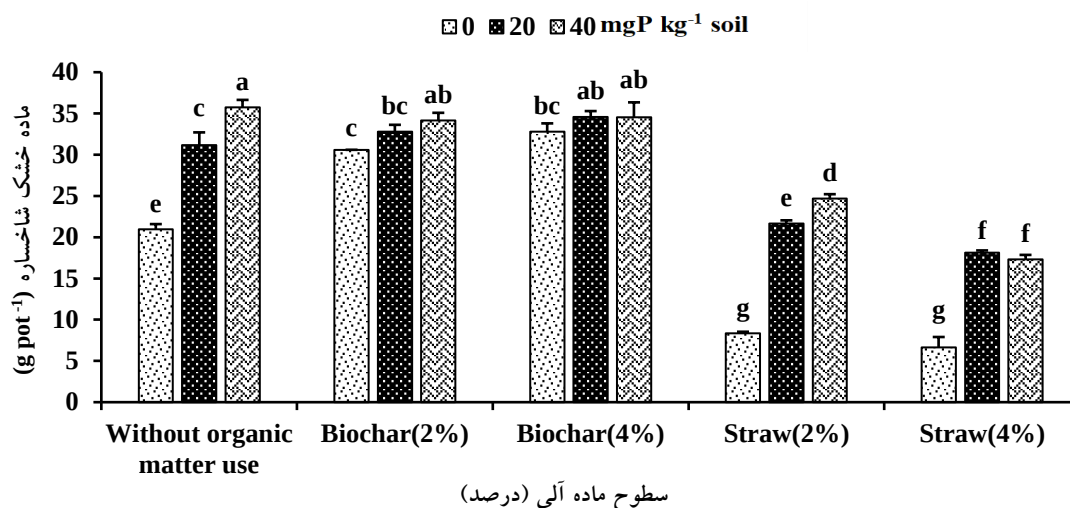
در شرایط این تحقیق گلخانه‌ای بین سطوح بیوچار مصرفی از نظر شاخص کلروفیل در سطوح متناظر فسفر کاربردی تفاوت معناداری وجود نداشت. همین نتیجه برای دو سطح کاه نیز صادق بود (شکل ۱). اگرچه ماده آلی مصرفی باعث کاهش شاخص کلروفیل شد، اما این کاهش برای زیست‌توده اولیه بیشتر از بیوچار مصرفی بود (شکل ۱). در مطالعه‌ای که سان و همکاران (Sun et al., 2017)

با مصرف بیوچار کاه ذرت در مقادیر مختلف (۰، ۱، ۳، ۵، ۱۵ و ۳۰ درصد) بر روند رشد گیاه ذرت در یک خاک اسیدی انجام دادند، گزارش کردند که استفاده از بیوچار به میزان یک تا پنج درصد باعث افزایش مقدار کلروفیل و میزان فتوسنتز گیاه ذرت شد. اما در این تحقیق در یک خاک

آهکی فقیر از ماده آلی به‌رغم مصرف ۲۵۰ میلی‌گرم نیتروژن بر کیلوگرم خاک در پنج نوبت شاخص کلروفیل باز هم کاهش یافت که دلایل متعددی می‌تواند داشته باشد. افزایش رشد گیاه، غیرمتحرک شدن نیتروژن معدنی و کاهش غلظت و جذب نیتروژن و برخی عناصر دیگر همگی می‌توانند از دلایل مذکور باشند. رابطه هم‌افزایی فسفر با نیتروژن و تأثیر مثبت فسفر مصرفی بر وضعیت نیتروژن گیاه و در نتیجه شاخص کلروفیل از دیرباز امر شناخته شده‌ای بوده و در این تحقیق گلدانی هم کود فسفر مصرفی به‌طور معناداری شاخص کلروفیل را بهبود بخشید (شکل ۱).

ماده خشک شاخساره

ماده خشک از مهم‌ترین صفات زراعی است و تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و اثر متقابل آن‌ها بر ماده خشک شاخساره کلزا در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۴).



شکل ۲- مقایسه میانگین‌های ماده خشک شاخساره برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر

Figure 2- Comparison of shoot dry matter averages for the interaction effect of organic matter and phosphorus

بدون فسفر نداشت (شکل ۲). اگرچه به دلیل نسبت بالای کربن به نیتروژن در کاه و کلش مورد استفاده، موضوع غیر متحرک شدن عناصر از جمله نیتروژن و فسفر کاملاً متفی نیست، ولی در منابع معتبر بیان شده است که محصولات حاصل از تجزیه کاه همانند اسیدهای آلی با جرم مولکولی بالا (به‌ویژه اسیدهای فولیک) باعث ایجاد شرایط کم‌هوازی یا بی‌هوازی موضعی در خاک شده و موجب تولید اسیدهای فنولیک، اسیدهای آلیفاتیک و اسیدهای چرب می‌شود که این شرایط باعث کاهش عملکرد محصول می‌شود (Marschner., 2011). در مطالعه‌ای که بر روی بیوجار حاصل از ساقه ذرت بر پویایی فسفر و رشد ذرت در یک خاک رسی انجام گرفت، نتایج نشان داد که بیوجار باعث افزایش ماده خشک شاخساره گیاه ذرت به میزان ۴۸/۷ درصد در مقایسه با شاهد شد (Amin., 2018). با توجه به شکل ۲ بیوجار مورد استفاده در این پژوهش در دو سطح دو و چهار درصد به ترتیب ۴۶ و ۵۶/۵ درصد باعث افزایش ماده خشک شاخساره کلزا در مقایسه با شاهد گردید. توجه و همکاران (Tavajjoh et al., 2016) گزارش کردند که با افزایش سطوح فسفر مصرفی از ۲۵ تا ۵۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک ماده خشک شاخساره گیاه کلزا افزایش یافت. در مطالعه‌ای که توسط ملا و همکاران (Molla et al., 2017) بر روی بیوجار حاصل از خاک اره و تأثیر آن بر عناصر غذایی و عملکرد گیاه تاج‌خروس

مقایسه میانگین‌های ماده خشک شاخساره برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که بیشترین ماده خشک شاخساره در سطح صفر ماده آلی ولی با مصرف ۴۰ میلی-گرم فسفر حاصل شد که با سطح دو درصد بیوجار با مصرف ۴۰ میلی‌گرم فسفر و تیمار چهار درصد بیوجار با مصرف ۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم فسفر مصرفی تفاوت معناداری نداشت (شکل ۲). این موضوع حائز اهمیت است چون در یک خاک آهکی فقیر از فسفر قابل جذب، کاربرد بیوجار به تنهایی و بدون کاربرد فسفر توانسته در سطح دو درصد معادل ۲۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک (حدود ۴۰ کیلوگرم فسفر بر هکتار) بر ماده خشک گیاه کلزا اثرگذار باشد.

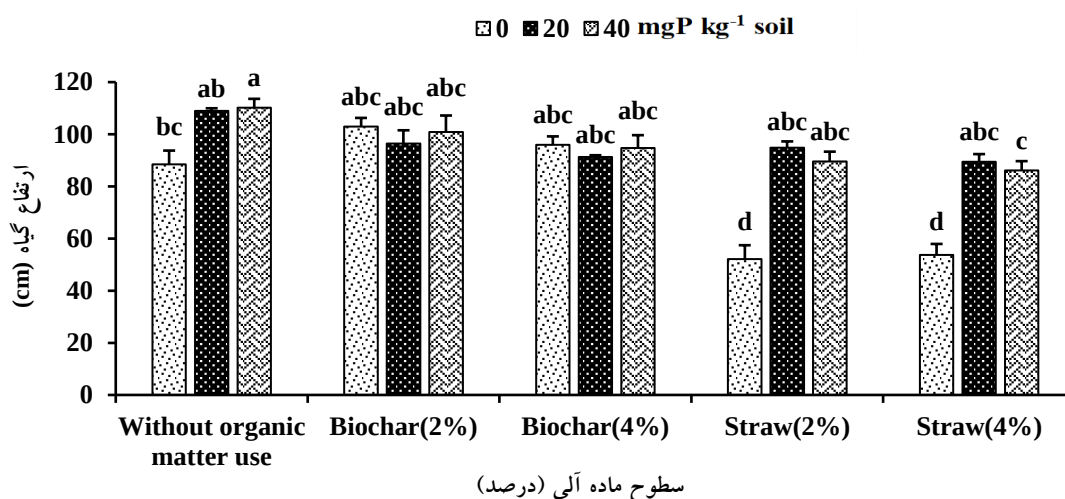
بر اساس جدول شماره ۳، بیوجار تولیدشده در این تحقیق خود دارای مقدار قابل توجهی فسفر است و احتمالاً همین فسفر باعث تأمین فسفر مورد نیاز گیاه و عدم تفاوت بین سطوح ۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم شده است. بدیهی است اثر فسفر همراه بیوجار مثل همه منابع کودی دیگر دارای اثر باقیمانده بوده و اینکه این اثر باقیمانده چند سال خواهد بود نیازمند تحقیقات مستقلی است. با توجه به گرانی کودهای فسفوری و همین‌طور آلودگی آن‌ها به فلزات سنگین به‌ویژه کادمیم این نتیجه حائز اهمیت است. کمترین ماده خشک نیز در سطح چهار درصد کاه بدون فسفر مصرفی بود که البته تفاوت معناداری با سطح دو درصد کاه

بر رشد کاهو (*Lactuca sativa*) و کلم (*Brassica chinensis*) بررسی و گزارش کردند که کاربرد بیوچار حاصل از پوسته برنج سبب افزایش ماده خشک شاخساره هر دو گیاه در مقایسه با شاهد شد.

ارتفاع گیاه

نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و اثر متقابل آن‌ها بر ارتفاع گیاه در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۴).

(*Amaranthus tricolor*) انجام گرفت، گزارش شد که مصرف ۱۵ تن در هکتار بیوچار باعث افزایش ماده خشک شاخساره در مقایسه با شاهد شد. پارک و همکاران (Park et al., 2011) گزارش کردند که افزودن بیوچار به خاک اسیدی باعث افزایش ماده خشک گیاه گندم به میزان ۳۵/۳ درصد نسبت به سطح شاهد شد. حسینی و همکاران (Hoseini et al., 2009) گزارش کردند که افزودن فسفر به خاک تا سطح ۴۰ میلی گرم فسفر بر کیلوگرم خاک باعث افزایش معنادار ماده خشک گیاه کلزا شد و افزودن بیشتر فسفر بر ماده خشک گیاه تأثیر معناداری نداشت. کارتر و همکاران (Carter et al., 2013) در گلخانه اثر بیوچار را



شکل ۳- مقایسه میانگین‌های ارتفاع گیاه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر

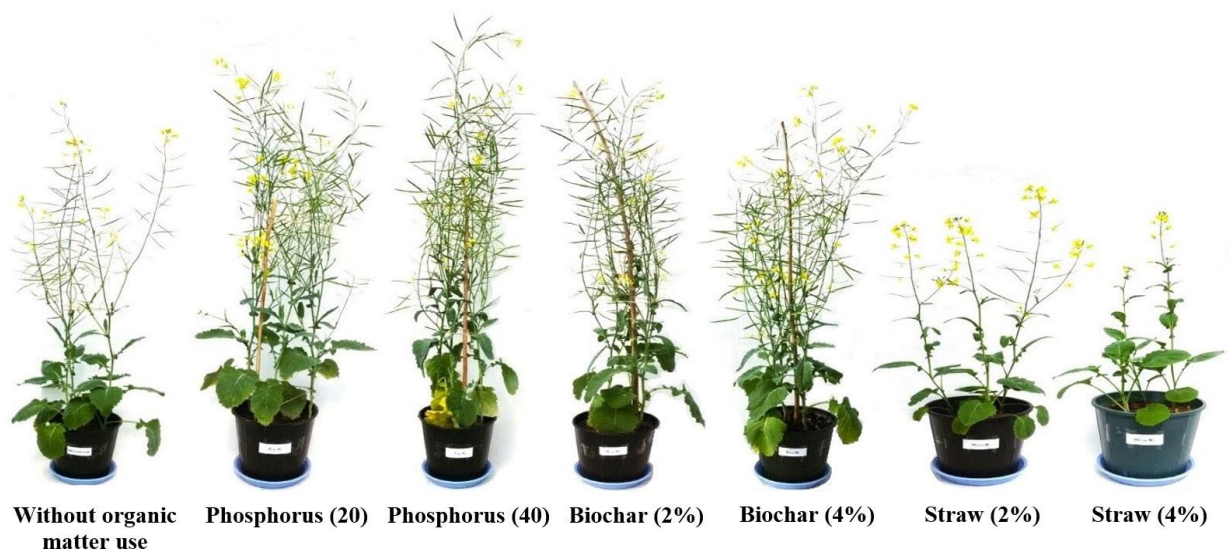
Figure 3- Comparison of plant height averages for the interaction effect of organic matter and phosphorus

معناداری وجود نداشت. در شرایط این تحقیق گلدانی کاربرد بیوچار تا سطح دو درصد باعث اثر مثبت بر ارتفاع گیاه و افزایش رشد بوده است و پس از آن افزایش بیوچار اثر معناداری بر ارتفاع گیاه نداشت. همان‌طور که قبلاً نیز مشاهده شد، بیوچار تولید و مورد استفاده در این تحقیق خود دارای مقدار قابل توجهی فسفر بود (جدول شماره ۳). توجه و همکاران (Tavajjoh et al., 2016) گزارش کردند که با افزایش سطوح فسفر از ۲۵ تا ۵۰ میلی گرم فسفر بر کیلوگرم خاک ارتفاع گیاه کلزا به‌طور معناداری افزایش یافت. سان و همکاران (Sun et al., 2017) نیز گزارش

مقایسه میانگین‌های ارتفاع گیاه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که بیشترین ارتفاع گیاه در سطح شاهد ماده آلی با مصرف ۴۰ میلی گرم فسفر حاصل شد و با سطح شاهد ماده آلی بدون فسفر، سطح دو و چهار درصد کاه بدون فسفر و سطح چهار درصد کاه با مصرف ۴۰ میلی گرم فسفر تفاوت معناداری داشت (شکل ۳). همچنین کمترین ارتفاع گیاه نیز در سطح دو و چهار درصد کاه بدون کود فسفر مصرفی به دست آمد (شکل ۴). با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که در دو سطح بیوچار مصرفی بدون توجه به سطح فسفر مصرفی، از نظر ارتفاع گیاه تفاوت

کردند که افزودن بیوچار حاصل از کاه ذرت به میزان یک تا پنج درصد در یک خاک اسیدی باعث افزایش ارتفاع گیاه ذرت شد. در مطالعه‌ای که بر روی سطوح مختلف بیوچار (صفر، ۴۰ و ۸۰ تن در هکتار) بر کارایی مصرف آب و محصول گندم در شرایط گلخانه‌ای انجام شد؛ نتایج نشان داد که با افزایش بیوچار در خاک روند افزایشی در ارتفاع گیاه گندم مشاهده شد شبان و همکاران (۱۳۹۶). در مطالعه‌ای که بر روی تأثیر فسفر (صفر، ۲۰، ۴۰ و ۸۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک) و شوری بر رشد گیاه کلزا انجام

گرفت، نتایج نشان داد که افزودن فسفر در خاک فقط تا ۲۰ میلی‌گرم فسفر در کیلوگرم خاک سبب افزایش معنادار ارتفاع گیاه گردید، لیکن مصرف بیشتر آن سبب افزایش معناداری نشد (Hoseini et al., 2009). کارتر و همکاران (Carter et al., 2013) در یک تحقیق گلخانه‌ای اثر مقادیر ۲۵، ۵۰ و ۱۵۰ گرم در کیلوگرم بیوچار را بر رشد کاهو و کلم بررسی و گزارش کردند که کاربرد بیوچار سبب افزایش ارتفاع هر دو گیاه در مقایسه با شاهد شد.



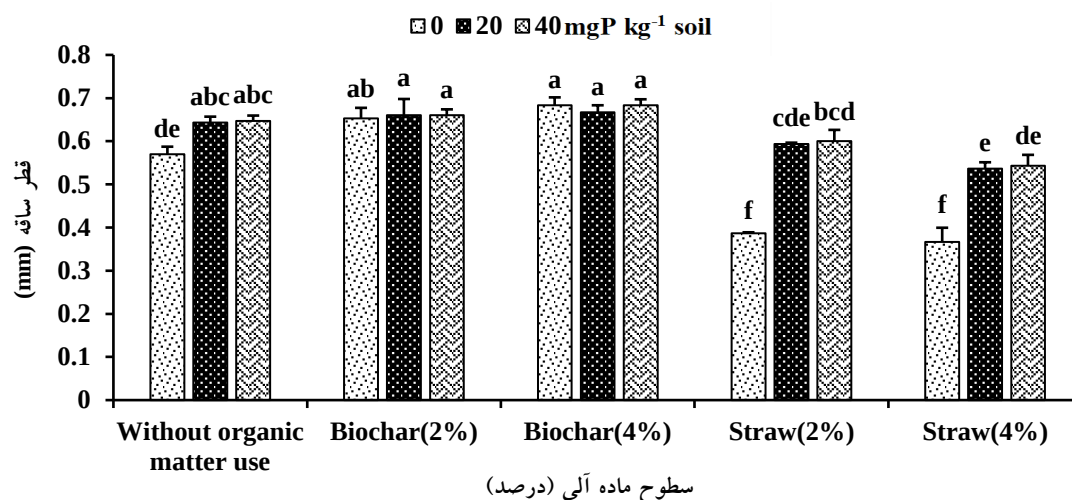
شکل ۴- نمایی از گیاهان کلزا ۷۰ روز پس از کشت در گلخانه

Figure 4- A view of different levels of rapeseed plants 70 days after cultivation in the greenhouse

قطر ساقه در محل طوقه

قطر ساقه از صفات مهم مورفولوژی گیاه کلزا است که در پایداری گیاه در مقابل ورس یا خوابیدگی بسیار

حائز اهمیت است. نتایج به‌دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و اثر متقابل آن‌ها بر قطر ساقه در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۴).



شکل ۵- مقایسه میانگین‌های قطر ساقه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر

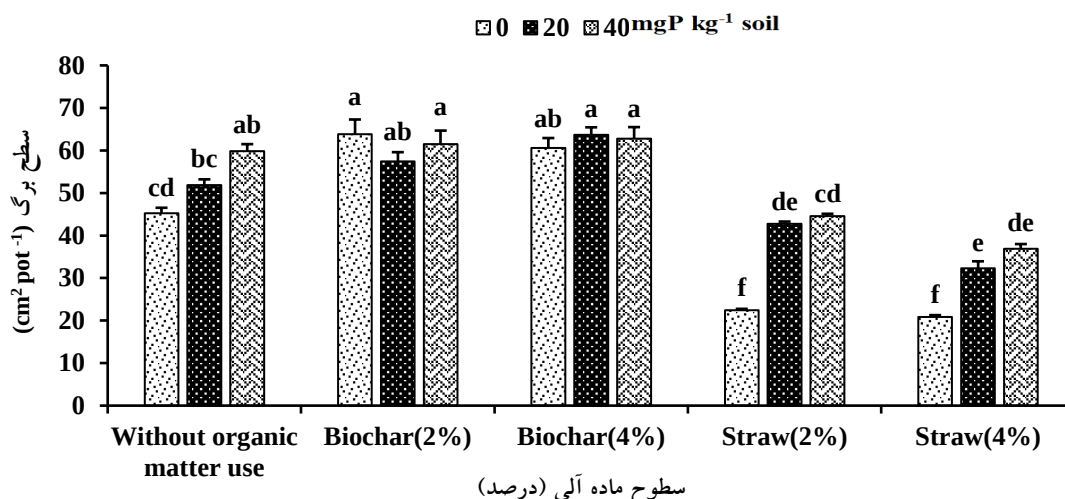
Figure 5- Comparison of stem diameter averages for the interaction effect of organic matter and phosphorus

گزارش کردند که استفاده از بیوجار به میزان یک تا پنج درصد در یک خاک اسیدی باعث افزایش قطر ساقه گیاه ذرت شد. غنائی (Ghanai, 2014) گزارش کرد که هیچ یک از سطوح مصرفی کود فسفر از منبع سوپرفسفات تریپل در خاک آهکی تأثیر معناداری بر روی قطر ساقه کلزا نداشت.

سطح برگ

نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و اثر متقابل آن‌ها بر سطح برگ در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۴).

مقایسه میانگین‌های قطر ساقه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که بیشترین قطر ساقه در تیمارهای چهار درصد بیوجار بدون فسفر و چهار درصد بیوجار با مصرف ۴۰ میلی گرم فسفر بود ولی با سطح شاهد با مصرف ۲۰ و ۴۰ میلی گرم فسفر، سطح صفر، ۲۰ و ۴۰ میلی گرم فسفر و سطح چهار درصد بیوجار با مصرف ۲۰ میلی گرم فسفر مصرفی تفاوت معناداری نداشت و کمترین آن نیز در سطح چهار درصد کاه بدون فسفر بود که البته با سطح دو درصد کاه تفاوت معناداری نداشت (شکل ۵). مقایسه دو سطح بیوجار مصرفی نشان داد که در همه سطوح فسفر از نظر قطر ساقه تفاوت معناداری نداشت. در مطالعه‌ای که سان و همکاران (Sun et al., 2017) بر روی بیوجار کاه ذرت و تأثیر آن بر روند رشد گیاه ذرت انجام دادند؛



شکل ۶- مقایسه میانگین‌های سطح برگ برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر

Figure 6- Comparison of leaf area averages for the interaction effect of organic matter and phosphorus

نیترژن و فسفر بر رشد و عملکرد دانه را بررسی و گزارش کردند که افزودن کود فسفر به خاک باعث افزایش شاخص سطح برگ کلزا نسبت به تیمار شاهد شد. تاکاراگوا و همکاران (Takaragawa et al., 2017) گزارش کردند استفاده از بیوجار تأثیر مثبت بر رشد گیاه آفتابگردان در طول مرحله رشد داشت که این امر باعث افزایش شاخص سطح برگ نسبت به شاهد گردید. بنگال و دادلی (Ben-Gal & Dudley., 2003) افزایش سطح برگ و تعداد برگ‌های ذرت را در اثر کاربرد فسفر گزارش کردند. حسینی و همکاران (Hoseini et al., 2009) گزارش کردند که با افزایش سطوح فسفر از ۲۰ تا ۸۰ میلی گرم فسفر بر کیلوگرم خاک شاخص سطح برگ کلزا افزایش یافت.

مقایسه میانگین‌های سطح برگ برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که بیشترین سطح برگ در سطح دو درصد بیوجار بدون مصرف فسفر به دست آمد که البته با سطح دو درصد بیوجار با مصرف ۲۰ و ۴۰ میلی گرم فسفر و سطح چهار درصد بیوجار در همه سطوح فسفر مصرفی تفاوت معناداری نداشت. کمترین سطح برگ نیز در سطح چهار درصد کاه بدون فسفر مصرفی بود که البته با سطح دو درصد کاه بدون فسفر مصرفی تفاوت معناداری نداشت (شکل ۶). مقایسه دو سطح بیوجار مصرفی نشان داد که در سطوح متناظر فسفر مصرفی از نظر سطح برگ تفاوت معناداری وجود نداشت. چیمبا و همکاران (Cheema et al., 2001) تأثیر زمان و میزان مصرف

جدول ۵- تجزیه واریانس تأثیر سطوح ماده آلی و فسفر بر کارایی مصرف آب، ماده خشک ریشه، حجم ریشه، ماده خشک دانه و تعداد غلاف

Table 5- Analysis variance of the effect of organic matter and phosphorus levels on water use efficiency, root dry matter, root volume, seed dry matter and number of pods

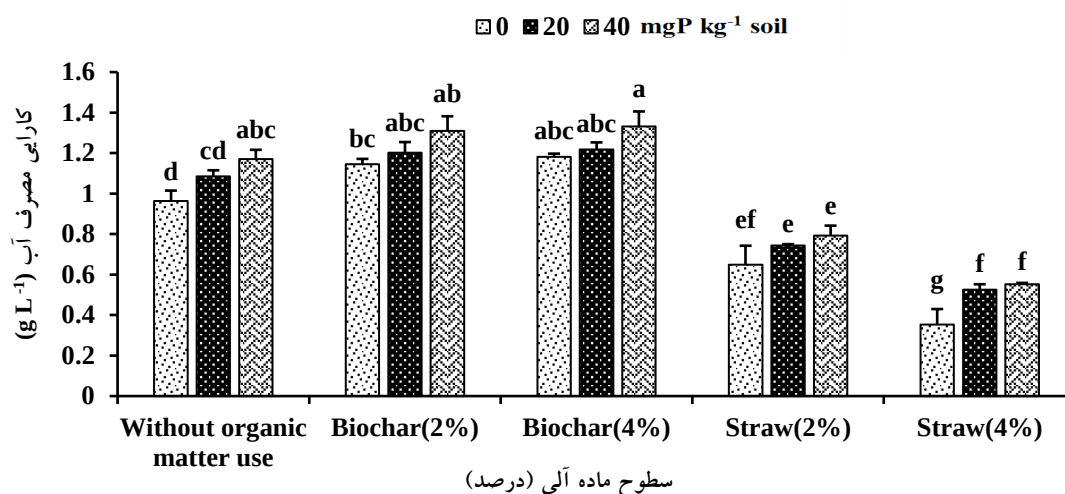
میانگین مربعات						
منابع تغییر	درجه آزادی	کارایی مصرف آب	ماده خشک ریشه	حجم ریشه	ماده خشک دانه	تعداد غلاف
ماده آلی	4	1.005**	70.826**	182.700**	297.786**	7219.852**
فسفر	2	0.113**	43.702**	420.289**	48.550**	1716.750**
ماده آلی × فسفر	8	0.003 ^{ns}	3.353**	82.900**	3.764**	460.517**
خطا	30	0.008	0.227	4.311	0.864	39.713
ضریب تغییرات (درصد)		9.33	5.60	7.73	9.04	4

^{ns} و ^{**} به ترتیب غیرمعنادار و معنادار در سطح احتمال یک درصد

کارایی مصرف آب

سطح احتمال یک درصد معنادار بود، اما اثر متقابل آن‌ها غیرمعنادار شد (جدول ۵).

نتایج به‌دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر بر کارایی مصرف آب در



شکل ۷- مقایسه میانگین‌های کارایی مصرف آب برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر

Figure 7- Comparison of water use efficiency averages for the interaction effect of organic matter and phosphorus

مصرف آب را به میزان ۶، ۱۳۹ و ۹۱ درصد افزایش داد. کاهش مقدار آب مصرفی احتمالاً به دلیل اثرات مثبت بیوچار است. بیوچار به دلیل سطح ویژه زیاد و تخلخل بالایی که دارد مقدار آب بیشتری در خود نگه می‌دارد و مانع تبخیر و از دست رفتن آب موجود در خاک می‌شود. اختر و همکاران (Akhtar et al., 2014) در آزمایشی بیوچار حاصل از پوسته برنج و دانه کتان را بر عملکرد گوجه‌فرنگی بررسی و گزارش کردند که با افزودن پنج درصد وزنی بیوچار، به‌رغم اعمال کم آبیاری، کارایی مصرف آب به میزان ۳۵ درصد افزایش یافت. در مطالعه‌ای که بر روی سطوح مختلف بیوچار (صفر، ۴۰ و ۸۰ تن در هکتار) بر کارایی مصرف آب و محصول گندم در شرایط گلخانه‌ای انجام شد؛ نتایج نشان داد که بیشترین کارایی مصرف آب در سطح ۸۰ تن در هکتار بیوچار حاصل شد (Shaban et al., 2017). استینر و همکاران (Steiner et al., 2010) گزارش کردند که با کاربرد بیوچار به‌عنوان اصلاح کننده خاک، راندمان مصرف آب در کشت ذرت به دلیل افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک توسط بیوچار

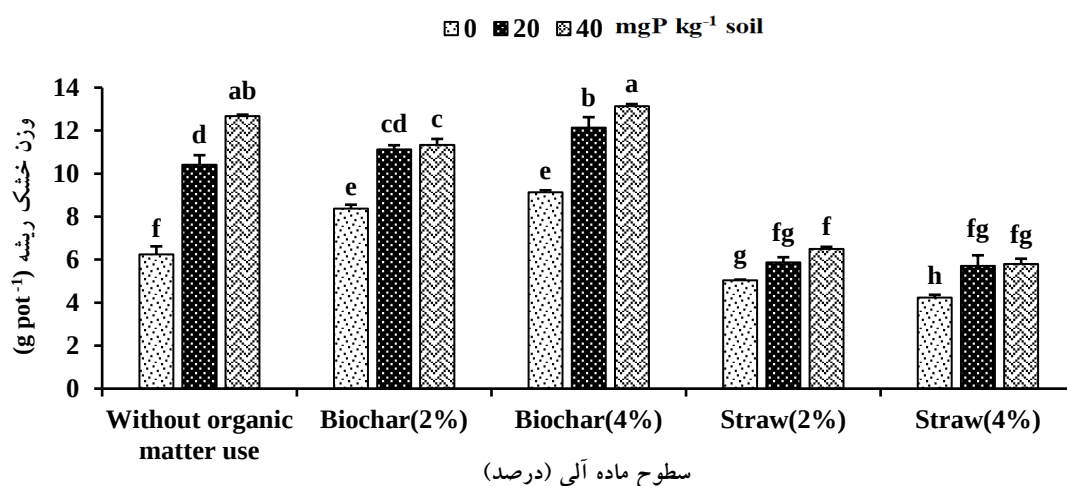
مقایسه میانگین‌های کارایی مصرف آب برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که بیشترین کارایی مصرف آب در سطح چهار درصد بیوچار با مصرف ۴۰ میلی‌گرم فسفر بدست آمد که البته تفاوت معناداری با سطح چهار درصد بیوچار با مصرف صفر و ۴۰ میلی‌گرم فسفر، سطح دو درصد بیوچار با مصرف ۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم فسفر و سطح شاهد ماده آلی با مصرف ۴۰ میلی‌گرم فسفر تفاوت معناداری نداشت. کمترین کارایی مصرف آب نیز در سطح چهار درصد کاه بدون فسفر مصرفی بود (شکل ۷). آگبنا و همکاران (Agbna et al., 2017) تأثیر بیوچار (۰، ۲۵ و ۵۰ تن در هکتار) را بر عملکرد گوجه‌فرنگی و کارایی مصرف آب آبیاری بررسی و گزارش کردند بیوچار باعث افزایش کارایی مصرف آب آبیاری و عملکرد گوجه‌فرنگی در مقایسه با شاهد شد. در تحقیقی وزما و همکاران (Uzoma et al., 2011) تأثیر افزودن بیوچار حاصل از کود گاوی در دمای پیرولیز ۵۰۰ درجه سلسیوس به خاک شنی زیر کشت ذرت را بررسی و گزارش کردند که کاربرد ۱۰، ۱۵ و ۲۰ تن در هکتار بیوچار در مقایسه با شاهد کارایی

این امر را افزایش شوری محلول خاک توسط بیوپچار در سطح ۱۰۰ تن در هکتار اعلام کردند.

ماده خشک ریشه

نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و اثر متقابل آن‌ها بر ماده خشک ریشه در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۵).

افزایش یافت. پورمنصور و رزاقی (Pourmansour and Razaghi, 2016). تأثیر سطوح مختلف بیوپچار (صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ تن در هکتار) و کم آبیاری بر راندمان مصرف آب در باقلا را بررسی و گزارش کردند که کاربرد سطوح ۲۵، ۵۰ و ۷۵ تن در هکتار بیوپچار حاصل از کاه گندم باعث افزایش راندمان مصرف آب در مقایسه با شاهد شد، که به دلیل توانایی بالای بیوپچار در نگه‌داشت آب در خاک نسبت داده شد، درحالی که سطح ۱۰۰ تن در هکتار بیوپچار باعث کاهش راندمان مصرف آب گردید که دلیل



شکل ۸- مقایسه میانگین‌های ماده خشک ریشه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر

Figure 8- Comparison of root dry matter averages for the interaction effect of organic matter and phosphorus

حتی برخی از آن‌ها به داخل منافذ بیوپچار نفوذ می‌کنند. بیوپچار به دلیل بهبود حاصلخیزی فیزیکی و شیمیایی خاک می‌تواند نقش قابل توجهی در افزایش رشد و توسعه ریشه داشته باشد. توجه و همکاران (Tavajjoh et al., 2016) گزارش کردند که با افزایش سطوح فسفر از ۲۵ تا ۵۰ میلی گرم فسفر بر کیلوگرم خاک ماده خشک ریشه گیاه کلزا به طور معناداری افزایش یافت. کارتر و همکاران (Carter et al., 2013) در آزمایشی گلخانه‌ای اثر مقادیر ۲۵، ۵۰ و ۱۵۰ گرم در کیلوگرم بیوپچار را بر رشد کاهو و کلم بررسی و گزارش کردند که کاربرد بیوپچار سبب افزایش ماده خشک ریشه هر دو گیاه در مقایسه با شاهد شد. چان و همکاران (Chan et al., 2007) گزارش کردند در خاک‌هایی که به علت تراکم و خشکی محدودیت رشد ریشه در آن‌ها وجود

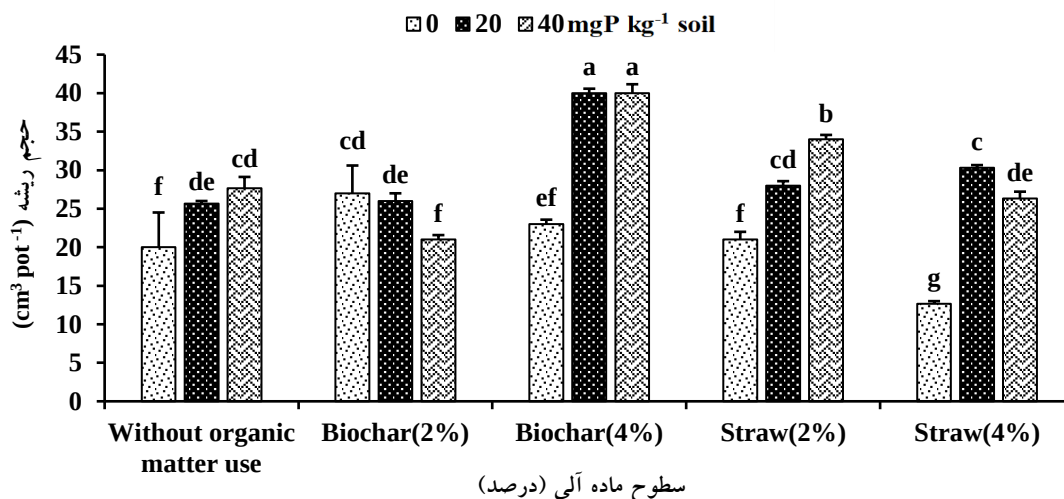
مقایسه میانگین‌های ماده خشک ریشه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که بیشترین ماده خشک ریشه در سطح چهار درصد بیوپچار با مصرف ۴۰ میلی گرم فسفر به دست آمد که البته تفاوت معناداری با سطح شاهد ماده آلی با مصرف ۴۰ میلی گرم فسفر مصرفی نداشت. همچنین، کمترین ماده خشک ریشه نیز در سطح چهار درصد کاه بدون فسفر مصرفی مشاهده شد (شکل ۸). سطوح تبدیلی بیوپچار حاوی عناصر غذایی مختلف می‌تواند ریشه گیاه را به سمت خود جذب کند. حتی این احتمال وجود دارد که ریشه‌های موئین گیاه به داخل ذرات بیوپچار نفوذ کنند. جوزف و همکاران (Joseph et al., 2010) بیان کردند که وقتی ریشه گیاه در مجاورت ذرات بیوپچار قرار می‌گیرد ریشه‌های موئین به سطوح بیوپچار متصل و

دارد، کاربرد بیوچار می‌تواند سبب افزایش توسعه ریشه در خاک شود. پرندرگاست-میلر و همکاران (Prendergast-Miller et al., 2011) گزارش کردند که افزودن بیوچار (۰، ۲۰ و ۶۰ تن در هکتار) باعث افزایش طول ریشه گندم شد. در مطالعه بعدی، (Prendergast-Miller et al., 2014) اشاره کردند که ریشه‌ها به سمت بیوچار جذب می‌شوند. برنان و همکاران (Brennan et al., 2014) به این نتیجه رسیدند که استقرار ریشه در خاک را می‌توان با افزودن بیوچار افزایش داد، اما انتخاب نوع بیوچار مهم است. در این تحقیق گلدانی و گلخانه‌ای مشخص گردید که کاه گندم در هر دو سطح دو و چهار درصد باعث کاهش اکثر صفات زراعی کلزا از جمله ماده خشک ریشه، شاخساره و دانه شد. به‌رغم مصرف ۵۰ میلی‌گرم نیتروژن قبل از شروع آزمایش و مصرف ۲۵۰ میلی‌گرم نیتروژن در پنج قسط، باز کاه گندم احتمالاً به دلیل غیرمتحرک کردن نیتروژن خاک به دلیل نسبت بالای کربن به نیتروژن در کاه باعث کاهش صفات زراعی کلزا شد. البته بحث غیرمتحرک شدن محدود به عنصر نیتروژن نبوده و در مورد بقیه عناصر هم کم‌وبیش اتفاق افتاده و تأثیر منفی بر رشد گیاه می‌گذارد (Havlin et al., 2019). تامسن و کریستنسن (Thomsen & Christensen., 1998) در آزمایشی، آبشویی نیتروژن کل در شرایط لایسیمتر اندازه‌گیری و گزارش کردند که مخلوط نمودن کاه با خاک، عملکرد و جذب نیتروژن را در جو کاهش داد و دلیل آن را طولانی نمودن دوره غیرمتحرک شدن نیتروژن ذکر کردند. همچنین ممکن است نسبت C/N بالا در کاه گندم و اثرات منفی آن بر عملکرد اثرات مثبت این ماده آلی را خنثی سازد، لذا

استفاده از بقایای غلات بدون توجه به بحث غیرمتحرک شدن عناصر به‌ویژه نیتروژن می‌تواند عملکرد محصول را به‌شدت تحت تأثیر قرار دهد (Bahrani et al., 2007). کاه گندم از جمله مواد آلی هستند که لیگنین زیاد داشته و به هنگام تجزیه تولید مواد سمی گیاهی همانند اسیدهای فنولیک مانند اسید پارا-کوماریک (P-Coumaric) و اسید پارا-هیدروکسی بنزوئیک (P-hydroxy benzoic) می‌کنند که به‌شدت رشد ریشه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. این مواد به‌دلیل اثرات خود بر سوخت‌وساز اکسین معروف هستند و فعالیت آنزیم اکسین اکسیداز را افزایش یا کاهش می‌دهند. در نتیجه تشکیل ریشه‌های فرعی و رشد طولی ریشه را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند (Marschner., 2011). البته اثر منفی این مواد علاوه بر غلظت اسیدهای فنولی و چرب فرار، به خصوصیات خاک به‌ویژه pH توده خاک و ریزوسفر نیز بستگی دارد. همچنین، با افزودن دو درصد به‌ویژه چهار درصد کاه گندم به خاک ممکن است در ریزمکان‌هایی که تهویه خاک ضعیف می‌شود، اتیلن انباشته شود. در غلظت کم ممکن است اتیلن رشد ریشه را تسریع کند اما در غلظت‌های بالا از رشد ریشه جلوگیری می‌کند (Marschner., 2011).

حجم ریشه

نتایج به‌دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و اثر متقابل آن‌ها بر حجم ریشه در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۵).



شکل ۹- مقایسه میانگین‌های حجم ریشه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر

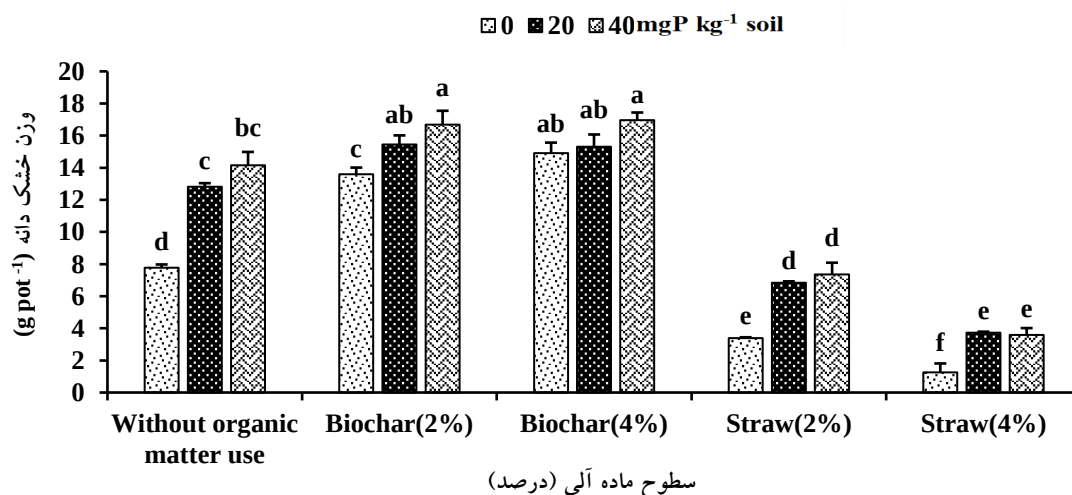
Figure 9- Comparison of root volume averages for the interaction effect of organic matter and phosphorus

نسبت کربن به نیتروژن، فعالیت میکروبی و غیرمتحرک شدن عناصر و تولید ترکیبات آلی مضر در اثر تجزیه کاه می‌توان اشاره کرد (Marschner., 2011).

ماده خشک دانه

نتایج به‌دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و اثر متقابل آن‌ها بر ماده خشک دانه در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۵).

مقایسه میانگین‌های حجم ریشه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که بیشترین حجم ریشه در سطح چهار درصد بیوجار با مصرف کود فسفر به‌دست آمد و کمترین آن نیز در سطح چهار درصد کاه بدون فسفر مصرفی اندازه‌گیری شد که البته با سطح دو درصد کاه بدون مصرف فسفر تفاوت معنادار آماری نداشت (شکل ۹). تأثیر مثبت کود فسفر مصرفی بر حجم ریشه با نقش مثبت فسفر بر توسعه ریشه گیاه و کمبود فسفر قابل جذب در خاک مورد آزمایش قابل توجیه است اما اثر منفی کاه بر حجم ریشه پیچیده بوده و به عوامل متعددی مثل بر هم خوردن



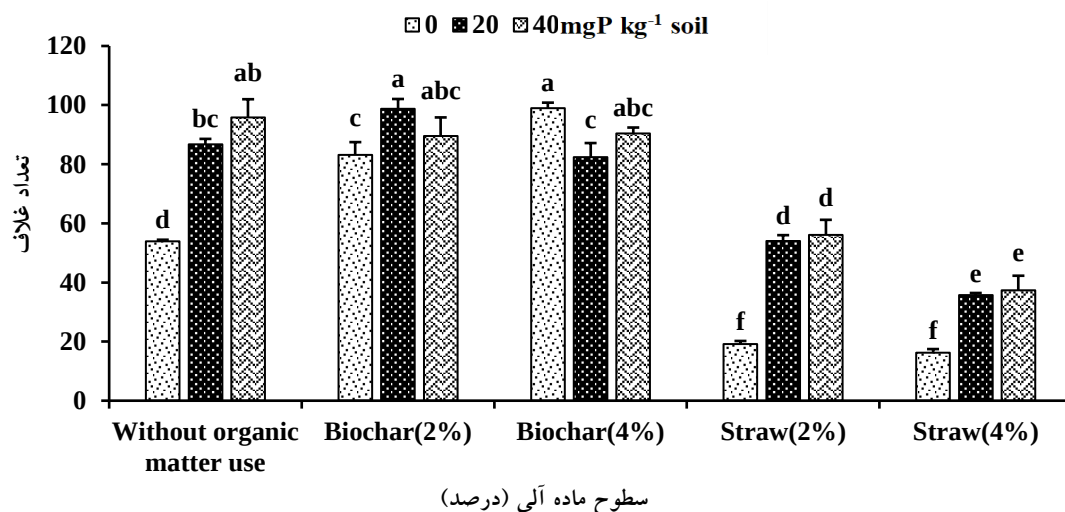
شکل ۱۰- مقایسه میانگین‌های ماده خشک دانه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر

Figure 10- Comparison of seed dry matter average for the interaction effect of organic matter and phosphorus

در هکتار ماده خشک دانه باقلا نسبت به شاهد افزایش یافت؛ به طوری که بیشترین ماده خشک دانه باقلا در سطح ۲۵ تن در هکتار بیوچار به دست آمد. این در حالی است که با افزودن مقادیر بالای بیوچار ۷۵ و ۱۰۰ تن در هکتار ماده خشک دانه نسبت به شاهد کاهش یافت که دلیل این کاهش وزن به دلیل افزایش شوری خاک حاصل از کاربرد بیوچار ذکر شد (Hoseini et al., 2009).

تعداد غلاف

نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و اثر متقابل آن‌ها بر تعداد غلاف در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۵).



شکل ۱۱- مقایسه میانگین‌های تعداد غلاف برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر

Figure 11- Comparison of number of pods average for the interaction effect of organic matter and phosphorus

در سطح چهار درصد کاه بدون فسفر مصرفی به دست آمد ولی تفاوت معناداری با سطح دو درصد کاه نداشت (شکل ۱۱). تعداد غلاف در گیاه یکی از مهم‌ترین اجزای عملکرد است که تابعی از طول دوره گلدهی، تعداد شاخه‌های فرعی در گیاه و شرایط اقلیمی هنگام گلدهی است. هر گونه تنش در این دوره سبب اختلال در گرده‌افشانی، کاهش تعداد گل، غلاف و دانه در گیاه می‌گردد. در مطالعه‌ای چیمبا و

مقایسه میانگین‌های ماده خشک دانه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که بیشترین ماده خشک دانه در سطوح دو و چهار درصد بیوچار با مصرف ۴۰ میلی گرم فسفر به دست آمد که البته با سطح چهار درصد بیوچار بدون مصرف کود فسفر و سطح دو درصد بیوچار با مصرف ۲۰ میلی گرم فسفر مصرفی تفاوت معناداری نداشت. همچنین کمترین ماده خشک دانه نیز در سطح چهار درصد کاه بدون مصرف فسفر به دست آمد (شکل ۱۰). شبان و همکاران (Shabanet al., 2017) گزارش کردند که با افزودن ۴۰ و ۸۰ تن در هکتار بیوچار ماده خشک دانه گندم در مقایسه با شاهد افزایش یافت. در مطالعه‌ای دیگر که بر روی تأثیر سطوح مختلف بیوچار و کم آبیاری بر راندمان مصرف آب در باقلا انجام گرفت، نتایج نشان داد که با افزایش بیوچار تا سطح ۲۵ و ۵۰ تن

مقایسه میانگین‌های تعداد غلاف برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که بیشترین تعداد غلاف در سطح چهار درصد بیوچار بدون فسفر به دست آمد که البته با سطح شاهد ماده آلی با مصرف ۴۰ میلی گرم فسفر، سطح دو درصد بیوچار با مصرف ۲۰ و ۴۰ میلی گرم فسفر و چهار درصد بیوچار با مصرف ۴۰ میلی گرم فسفر مصرفی تفاوت معناداری نداشت. بر طبق انتظار کمترین تعداد غلاف نیز

همکاران (Cheema et al., 2001) تأثیر زمان و میزان مصرف نیتروژن و فسفر بر رشد، عملکرد دانه و روغن کلزا را بررسی و گزارش کردند که افزودن کود فسفر به خاک باعث افزایش تعداد غلاف کلزا نسبت به تیمار شاهد شد. با

افزایش سطوح فسفر مصرفی از ۲۵ تا ۵۰ میلی گرم بر کیلو- گرم خاک تعداد غلاف گیاه کلزا به طور معناداری افزایش یافت (Tavajjoh et al., 2016).

جدول ۶- تجزیه واریانس تأثیر سطوح ماده آلی و فسفر بر وزن هزار دانه، درصد پروتئین دانه، مقدار پروتئین دانه، درصد روغن دانه و مقدار روغن دانه

Table 6- Analysis variance of the effect of organic matter and phosphorus levels on thousand seed weight, seed protein percentage, seed protein content, seed oil percentage and seed oil content

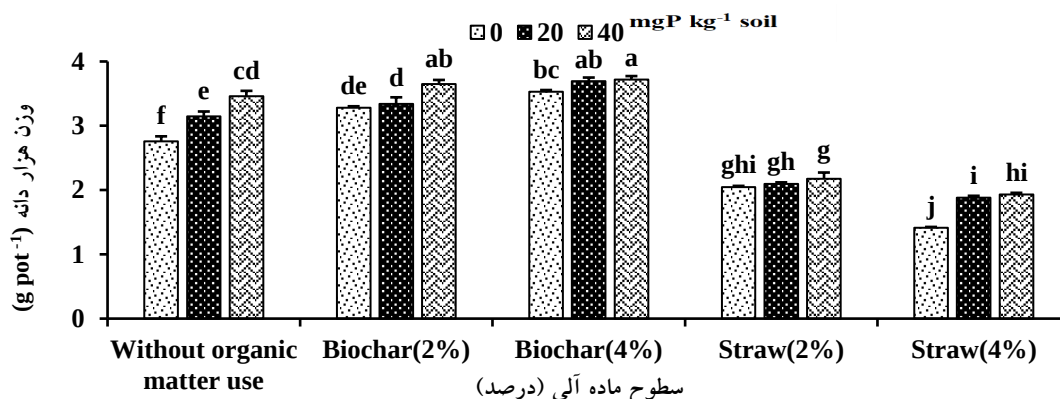
میانگین مربعات						
منابع تغییر	درجه آزادی	وزن هزار دانه	درصد پروتئین دانه	مقدار پروتئین دانه	درصد روغن دانه	مقدار روغن دانه
ماده آلی	4	6.323**	4.303 ^{ns}	88638.233**	71.950**	349826.898**
فسفر	2	0.551**	5.186 ^{ns}	21347.594**	38.214**	44696.504**
ماده آلی × فسفر	8	0.056**	12.343**	2531.546**	19.386**	8448.869**
خطا	30	0.011	2.710	548.447	4.427	1723.750
ضریب تغییرات (درصد)		3.66	8.55	12.20	6.66	12.29

^{ns} و ^{**} به ترتیب غیرمعنادار و معنادار در سطح احتمال یک درصد

وزن هزار دانه

وزن دانه بیان کننده اهمیت نمو دانه است و نقش مهمی را در میان اجرای عملکرد برای نشان دادن توان عملکرد یک رقم ایفا می کند (Olama et al., 2014). نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و اثر متقابل آن ها بر وزن هزار دانه در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۶). مقایسه میانگین های وزن هزار دانه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که بیشترین وزن هزار دانه در سطح چهار درصد

بیوجار با مصرف ۴۰ میلی گرم فسفر مصرفی به دست آمد که البته تفاوت معناداری با سطح چهار درصد بیوجار با مصرف ۲۰ میلی گرم فسفر و دو درصد بیوجار با مصرف ۴۰ میلی گرم فسفر مصرفی نداشت و کمترین آن نیز در سطح چهار درصد کاه بدون فسفر مصرفی مشاهده شد (شکل ۱۲). توجه و همکاران (۱۳۹۴) گزارش کردند که با افزایش سطوح فسفر از ۲۵ تا ۵۰ میلی گرم فسفر بر کیلوگرم خاک وزن هزار دانه گیاه کلزا به طور معناداری افزایش یافت.



شکل ۱۲- مقایسه میانگین های وزن هزار دانه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر

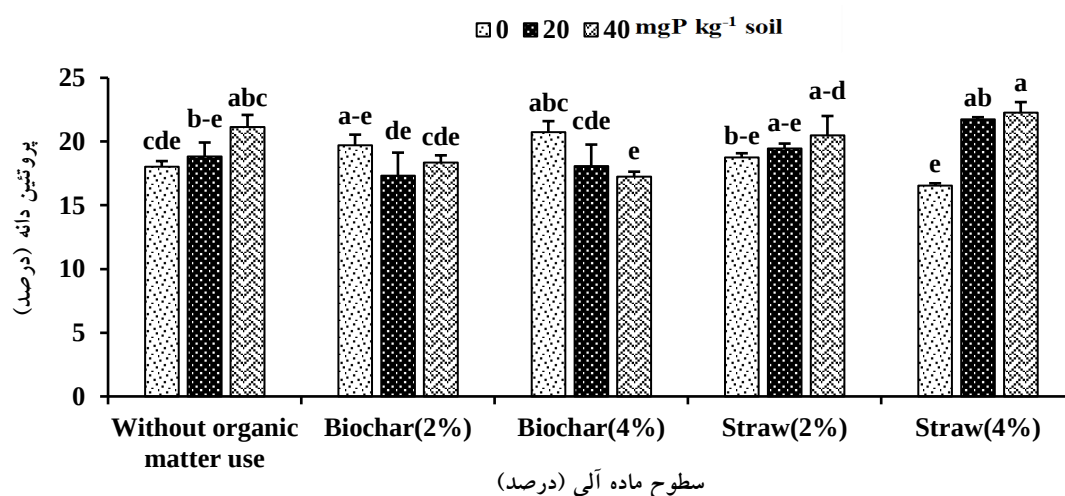
Figure 12- Comparison of weight of one thousand seeds averages for the interaction effect of organic matter and phosphorus

دانه گیاه شد. حسینی و همکاران (۱۳۸۷) نیز گزارش کردند که با افزایش سطوح فسفر از ۲۰ تا ۸۰ میلی گرم فسفر بر کیلوگرم خاک وزن هزار دانه کلزا افزایش یافت. از دیرباز نقش مثبت فسفر در دوره زایشی گیاهان و تولید دانه در تغذیه گیاه امر شناخته شده‌ای است (Havlin et al., 2019).

درصد پروتئین دانه

نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر غیرمعدن دار اما اثر متقابل ماده آلی و فسفر بر غلظت پروتئین دانه در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۶).

در مطالعه‌ای که بر روی سطوح مختلف بیوپچار (صفر، ۴۰ و ۸۰ تن در هکتار) بر برخی صفات کمی و کیفی گیاه گندم انجام شد، نتایج نشان داد که سطح ۴۰ تن در هکتار بیوپچار باعث افزایش ۲۰ درصدی وزن هزار دانه در مقایسه با شاهد شد. این در حالی است که سطح ۸۰ تن در هکتار بیوپچار فقط ۵/۱ درصد باعث افزایش وزن هزار دانه نسبت به شاهد گردید (شبان و همکاران، ۱۳۹۶). آلبوکرک و همکاران (Albuquerque et al., 2013) تأثیر بیوپچار و سطوح مختلف کود معدنی را بر عملکرد گیاه گندم بررسی و گزارش کردند که کاربرد سطوح ۰/۵، ۱ و ۲/۵ درصد وزنی دو نوع بیوپچار (کاه گندم و درخت زیتون) در ترکیب با کود معدنی باعث افزایش معنادار وزن هزار



شکل ۱۳- مقایسه میانگین‌های درصد پروتئین دانه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر

Figure 13- Comparison of seed protein percentages average for the interaction effect of organic matter and phosphorus

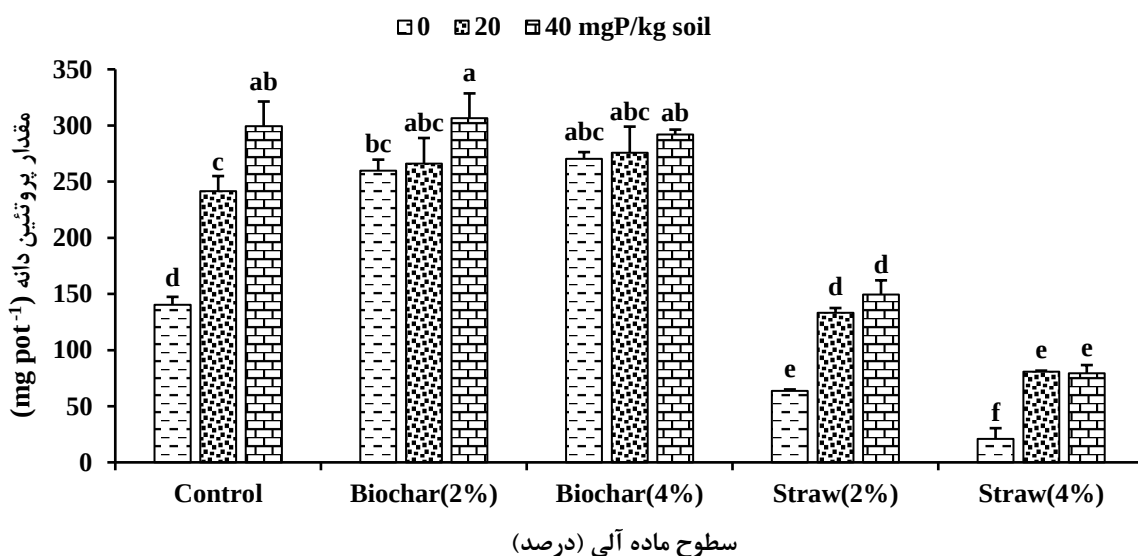
همکاران (Tavajjoh et al., 2016) گزارش کردند که با افزایش سطوح فسفر از ۲۵ تا ۵۰ میلی گرم فسفر بر کیلوگرم خاک درصد پروتئین دانه گیاه کلزا به ترتیب ۱۱/۶۳ و ۱۱/۸۲ برابر نسبت به شاهد افزایش یافت. در مطالعه‌ای که فتاحی‌نژاد و همکاران (Fatahinejad et al., 2013) بر روی تأثیر کود فسفر بر عملکرد، درصد روغن و پروتئین کلزا در زراعت دیم در شهرستان بهبهان به مدت دوسال زراعی (۱۳۸۷-۱۳۸۹) در خاک‌های مختلف انجام دادند، گزارش کردند که کود فسفر تأثیر معناداری بر درصد

مقایسه میانگین‌های درصد پروتئین دانه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که بیشترین درصد پروتئین دانه در سطح چهار درصد کاه با مصرف ۴۰ میلی گرم فسفر به دست آمد که البته با سطوح چهار درصد کاه با مصرف ۲۰ میلی گرم فسفر، دو درصد کاه با مصرف ۴۰ میلی گرم فسفر، چهار و دو درصد بیوپچار بدون مصرف فسفر و شاهد ماده آلی با مصرف ۴۰ میلی گرم فسفر تفاوت معناداری نداشت. همچنین کمترین پروتئین دانه نیز در سطح چهار درصد کاه بدون فسفر مصرفی بود (شکل ۱۳). توجه و

مقدار پروتئین دانه

مقدار پروتئین دانه از حاصل ضرب درصد پروتئین دانه در ماده خشک دانه حاصل شد. نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و اثر متقابل آن‌ها بر مقدار پروتئین دانه در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۶).

پروتئین دانه نداشت. در برخی شرایط کود فسفوری بر ترکیبات نیتروژن دار دانه کلزا اثر می‌گذارد و میزان اسیدهای آمینه آزاد (آرژنین و پرولین) را افزایش می‌دهد. البته این اثر اندک بوده و به طور کلی میزان پروتئین دانه کمتر تحت تأثیر فسفر قرار می‌گیرد.



شکل ۱۴- مقایسه میانگین‌های مقدار پروتئین دانه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر

Figure 14- Comparison of seed protein content average for the interaction effect of organic matter and phosphorus

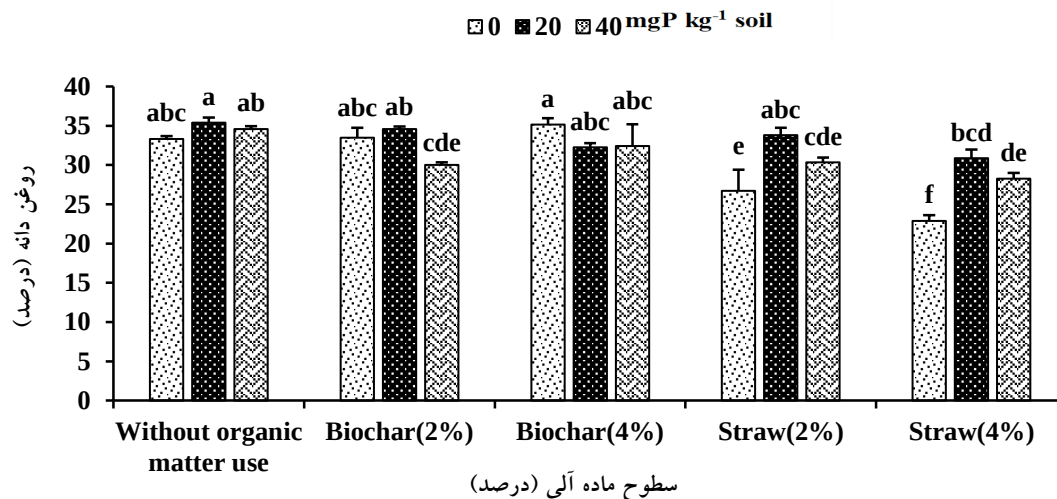
غلظت روغن دانه

نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و اثر متقابل آن‌ها بر درصد روغن دانه در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۶). مقایسه میانگین‌های درصد روغن دانه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که بیشترین درصد روغن دانه در سطح شاهد ماده آلی با مصرف ۲۰ میلی گرم فسفر و چهار درصد بیوجار بدون مصرف فسفر مشاهده شد. این نتیجه حائز اهمیت است که بیوجار چهار درصد در یک خاک فقیر از فسفر قابل جذب توانسته معادل فسفر در سطح ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک که تقریباً معادل ۴۰ کیلوگرم فسفر بر هکتار (با فرض دو میلیون کیلوگرم وزن خاک یک هکتار) که آن هم معادل ۴۰۰ کیلوگرم بر هکتار سوپر فسفات منفرد و یا ۲۰۰ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل است

مقایسه میانگین‌های مقدار پروتئین دانه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که در شرایط این تحقیق بیشترین مقدار پروتئین دانه در سطح دو درصد بیوجار با مصرف ۴۰ میلی گرم فسفر به دست آمد و کمترین پروتئین دانه نیز در سطح چهار درصد کاه بدون فسفر مصرفی بود (شکل ۱۴). با توجه به شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که با مصرف بیوجار در هر دو سطح دو و چهار درصد بدون مصرف فسفر مقدار پروتئین دانه تفاوت معناداری با تیمار بدون بیوجار ولی با مصرف ۴۰ میلی گرم فسفر بر کیلوگرم خاک ندارد. توجه و همکاران (۱۳۹۴) گزارش کردند که با افزایش سطوح فسفر از ۲۵ تا ۵۰ میلی گرم فسفر بر کیلوگرم خاک عملکرد پروتئین دانه گیاه کلزا به ترتیب ۶/۱۲ و ۶/۶۸ برابر نسبت به شاهد افزایش یافت.

مصرف ۴۰ میلی گرم فسفر، دو درصد کاه با مصرف صفر و ۴۰ میلی گرم فسفر و چهار درصد کاه با مصرف صفر، ۲۰ و ۴۰ میلی گرم فسفر مصرفی تفاوت معناداری داشت. همچنین کمترین درصد روغن دانه نیز در سطح چهار درصد کاه بدون فسفر مصرفی بود (شکل ۱۵).

عمل کند. با توجه به قیمت سوپرفسفات، واکنش‌های تثبیت فسفر در خاک و عواقب برهم خوردن نسبت عناصر در اثر مصرف بی‌رویه کودهای فسفوری حضور کادمیم و سایر آلاینده‌ها در کودهای فسفوری به نظر می‌رسد این یک نتیجه قابل توجهی است که البته با سطح دو درصد بیوجار با



شکل ۱۵- مقایسه میانگین‌های درصد روغن دانه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر

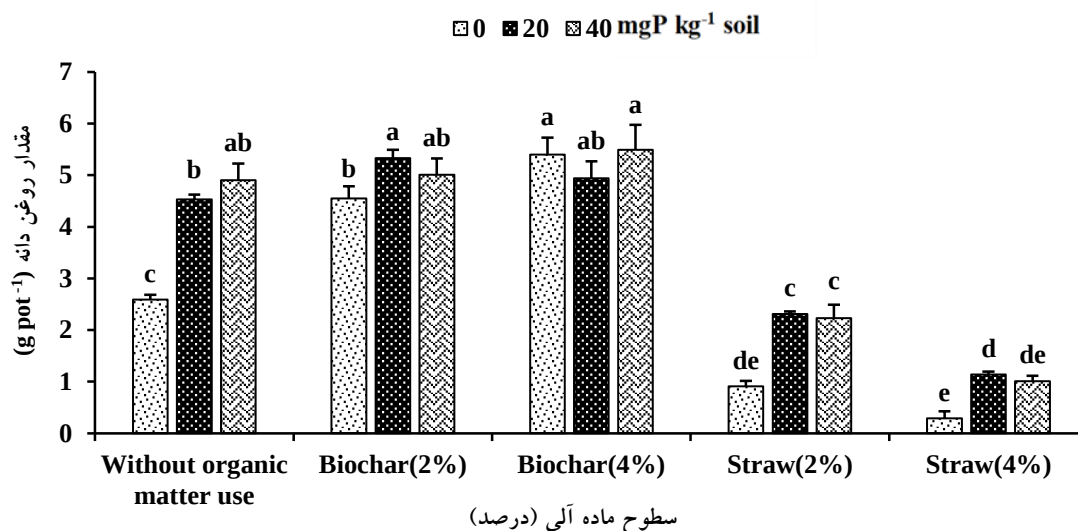
Figure 15- Comparison of seed oil percentage average for the interaction effect of organic matter and phosphorus

کمبود شدید فسفر مقدار روغن از ۳۳ درصد به ۲۳ درصد کاهش می‌یابد.

مقدار روغن دانه

مقدار روغن دانه از حاصل ضرب درصد روغن دانه در ماده خشک دانه به دست آمد و نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و فسفر و اثر متقابل آن‌ها بر مقدار روغن دانه در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۶).

غنایی (Ghanai, S. 2014) اثر متقابل خشکی و فسفر بر کلزا را بررسی و گزارش کرد که با افزایش سطوح مصرفی فسفر درصد روغن دانه روند افزایشی نشان داد؛ به طوری که با مصرف ۳۰۰ کیلوگرم فسفر بیشترین درصد روغن به دست آمد. توجه و همکاران (۱۳۹۴) گزارش کردند که با افزایش سطوح فسفر از ۲۵ تا ۵۰ میلی گرم فسفر بر کیلوگرم خاک درصد روغن دانه گیاه کلزا به ترتیب ۰/۲۶ و ۰/۶۹ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت. بوز (Bose., 1957) گزارش داد تغذیه فسفر در کشت کلزا تأثیر مهمی بر درصد روغن دانه دارد، به طوری که در شرایط



شکل ۱۶- مقایسه میانگین‌های مقدار روغن دانه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر

Figure 16- Comparison of seed oil content averages for the interaction effect of organic matter and phosphorus

پروتئین دانه و مقدار روغن دانه را در یک خاک متوسط بافت و قلیایی نسبت به شاهد به‌طور معناداری افزایش دادند، اما برخلاف بیوجار، مصرف کاه گندم سبب کاهش برخی خصوصیات مورفولوژیکی گیاه کلزا شد. البته اثر بیوجار بر ماده خشک گیاه در شرایط کمبود فسفر بیشتر از شرایط فسفر کافی بود. بیوجار مورد استفاده در این تحقیق سرشار از فسفر بود و حداقل در سال اول توانست همانند کود فسفره، نیاز گیاه را به فسفر برطرف کند. البته بدیهی است که جهت دانستن اثر باقیمانده فسفر بیوجار نیازمند تحقیقات آتی هستیم؛ بنابراین با توجه به نتایج به‌دست آمده از این تحقیق تبدیل کاه گندم به بیوجار و استفاده از بیوجار در خاک‌های آهکی را می‌توان امر مثبتی در رشد گیاه کلزا تلقی کرد و تحقیقات بیشتر با کاه غلات دیگر در مزرعه قابل توصیه است.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافع وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید نویسندگان مقاله است.

مقایسه میانگین‌های مقدار روغن دانه برای اثر متقابل ماده آلی و فسفر نشان داد که بیشترین مقدار روغن دانه در سطح چهار درصد بیوجار با مصرف ۴۰ میلی‌گرم فسفر و کمترین آن نیز در سطح چهار درصد کاه بدون مصرف فسفر حاصل شد (شکل ۱۶). توجه و همکاران (Tavajjoh et al., 2016) گزارش کردند که با افزایش سطوح فسفر از ۲۵ تا ۵۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک عملکرد روغن دانه گیاه کلزا به ترتیب ۹/۵۶ و ۱۵/۲۲ برابر نسبت به شاهد افزایش یافت. آنان دلیل این امر را این‌گونه بیان کردند که افزایش فراهمی فسفر در خاک سبب افزایش معنادار عملکرد روغن، دانه و انتقال فسفر به دانه‌ها می‌شود.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این تحقیق گلخانه‌ای نشان داد که مصرف بیوجار حاصل از کاه گندم تولید شده در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس و کود فسفر از منبع سوپرفسفات تریپل شاخص کلروفیل برگ، ارتفاع گیاه، ماده خشک شاخساره، ریشه و دانه، تعداد غلاف، وزن هزار دانه، کارایی مصرف آب، مقدار

References

1. Agbna, G. H., Dongli, S., Zhipeng, L., Elshaikh, N. A., Guangcheng, S., and Timm, L. C., 2017. Effects of deficit irrigation and biochar addition on the growth, yield, and quality of tomato. *Scientia Horticulturae*, 222, pp. 90-101
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.05.004>
2. Akhtar, S. S., Li, G., Andersen, M. N., and Liu, F., 2014. Biochar enhances yield and quality of tomato under reduced irrigation. *Agricultural Water Management*, 138, pp. 37-44 . <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.02.016>
3. Alburquerque, J. A., Calero, J. M., Barrón, V., Torrent, J., Del Campillo, M. C., Gallardo, A., and Villar, R., 2014. Effects of biochars produced from different feedstocks on soil properties and sunflower growth. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177, pp. 16-25 .<https://doi.org/10.1002/jpln.201200652>
4. Alburquerque, J. A., Salazar, P., Barrón, V., Torrent, J., del Campillo, M. d. C., Gallardo, A., and Villar, R., 2013. Enhanced wheat yield by biochar addition under different mineral fertilization levels. *Agronomy for Sustainable Development*, 33, pp. 475-484 .
<https://doi.org/10.1007/s13593-012-0128-3>
5. Amin, A. E.-E. A. Z., 2018. Phosphorus dynamics and corn growth under applications of corn stalks biochar in a clay soil. *Arabian Journal of Geosciences*, 11, pp. 379 .
<https://doi.org/10.1007/s12517-018-3719-8>
6. Anderson, C. R., Condon, L. M., Clough, T. J., Fiers, M., Stewart, A., Hill, R. A., and Sherlock, R. R., 2011. Biochar induced soil microbial community change: implications for biogeochemical cycling of carbon, nitrogen and phosphorus. *Pedobiologia*, 54, pp. 309-320 .<https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2011.07.005>
7. Atkinson, C. J., Fitzgerald, J. D., and Hipps, N. A., 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils :a review. *Plant and Soil*, 337, pp. 1-18 . <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0464-5>
8. Bahrani, M., Raufat, M., and Ghadiri, H., 2007. Influence of wheat residue management on irrigated corn grain production in a reduced tillage system. *Soil and Tillage Research*, 94, pp. 305-309 . <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.08.004>
9. Ben-Gal, A., and Dudley, L. M., 2003. Phosphorus availability under continuous point source irrigation. *Soil Science Society of America Journal*, 67, pp. 1449-1456
<https://doi.org/10.2136/sssaj2003.1449>
10. Bhattarai, B., Neupane, J., and Dhakal, S. P., 2015. Effect of biochar from different origin on physio-chemical properties of soil and yield of garden pea (*Pisum sativum* L.) at Paklihawa, Rupandehi, Nepal. *World Journal of Agricultural Research*, 3, pp. 129-138 .
<https://doi.org/10.12691/wjar-3-4-3>
11. Bose, T., 1957. Effect of nitrogen, phosphorus and potassium on growth, yield and oil content of mustard (*Brassicajuncea*). *Indian Agriculturist*, 1, pp. 29-38 .
12. Brennan, A., Jiménez, E. M., Puschenreiter, M., Alburquerque, J. A., and Switzer, C., 2014. Effects of biochar amendment on root traits and contaminant availability of maize plants in a copper and arsenic impacted soil. *Plant and Soil*, 379, pp. 351-360 .
<https://doi.org/10.1007/s11104-014-2074-0>
13. Carter, S., Shackley, S., Sohi, S., Suy, T. B., & Haefele, S., 2013. The impact of biochar application on soil properties and plant growth of pot grown lettuce (*Lactuca sativa*) and cabbage (*Brassica chinensis*). *Agronomy*, 3, pp. 404-418 .
<https://doi.org/10.3390/agronomy3020404>
14. Chan, K. Y., Van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A., and Joseph, S., 2007. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. *Soil Research*, 45, pp. 629-634 .
<https://doi.org/10.1071/SR07109>
15. Cheema, M., Malik, M., Hussain, A., Shah, S., and Basra, S., 2001. Effects of time and rate of nitrogen and phosphorus application on the growth and the seed and oil yields of canola (*Brassica napus* L.). *Journal of Agronomy and Crop Science*, 186, pp. 103-110 .
<https://doi.org/10.1046/j.1439-037X.2001.00463.x>

16. Dong, X., Ma, L. Q., & Li, Y., 2011. Characteristics and mechanisms of hexavalent chromium removal by biochar from sugar beet tailing. *Journal of Hazardous Materials*, 190, pp. 909-915 . <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.04.008>
17. Egle, L., Zoboli, O., Thaler, S., Rechberger, H., and Zessner, M., 2014. The Austrian P budget as a basis for resource optimization. *Resources, Conservation and Recycling*, 83, pp. 152-162 <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.09.009>
18. Fatahinejad, E., Siadat, A., Esfandiyari, M., Moghadasi, R., and Moezi, A., 2013. Effect of phosphorus fertilizer on yield, oil and canola protein in dry farming in different groups of soil phosphorus fertility. *Crop physiology*, 5, pp. 83-100. <https://sid.ir/paper/174476/en>
19. Frišták, V., and Soja, G., 2015. Effect of wood-based biochar and sewage sludge amendments for soil phosphorus availability. *Nova biotechnologica et chimica*, 14, pp. 104-115 .<https://doi.org/10.1515/nbec-2015-0020>
20. Ghanai, S. 2014. The interaction effect of drought and phosphorus on rapeseed in Gonbad region. *National Conference on Climate Change and Sustainable Agriculture, Tehran, Tolo Farzin Science and Industry Company*. (In Persian). <https://civilica.com/doc/282354>
21. Gee, G. W., and Bauder, J. W., 1986. Particle-size analysis. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, 5, pp. 383-411 .<https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15>
22. Guo, Y., Tang, H., Li, G., and Xie, D., 2014. Effects of cow dung biochar amendment on adsorption and leaching of nutrient from an acid yellow soil irrigated with biogas slurry . *Water, Air, & Soil Pollution*, 225, pp. 1-13 . <https://doi.org/10.1007/s11270-013-1820-x>
23. Havlin J. L., Beaton J. D., Tisdale S. L., and Nelson W. L., 1999. Soil Fertility and Fertilizers, 6 Ed. Soil Science Society of America. Madison, Wisc.
24. Hoseini, Y., Homaei, M., Karimian, N.A., and Saadat, S., 2009. The effects of phosphorus and salinity on growth, nutrient concentrations, and water use efficiency in canola (*Brassica napus* L.). *Agricultural Research*, 8, pp. 1-18. (In Persian). <https://sid.ir/paper/84857/en>
25. Jones, J. B., 2001. Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis: CRC press, Boca Raton, FL.
26. Joseph, S. D., Camps-Arbestain, M., Lin, Y., Munroe, P., Chia, C., Hook, J., and Singh, B. 2010. An investigation into the reactions of biochar in soil. *Soil Research*, 48, pp. 501-515 . <https://doi.org/10.1071/SR10009>
27. Lehmann, J., Gaunt, J., and Rondon, M., 2006. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems—a review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11, pp. 403-427 .<https://doi.org/10.1007/s11027-005-9006-5>
28. Lehmann, J., and Joseph, S., 2015. *Biochar for Environmental Management :science, technology and implementation*: Routledge.
29. Lindsay, W. L., and Norvell, W., 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42, pp. 421-428 . <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>
30. Lindsay, W. L., Vlek, P. L., and Chien, S. H., 1989. Phosphate minerals. *Minerals in Soil Environments*, 1, pp. 1089-1130 . <https://doi.org/10.2136/sssabookser1.2ed.c22>
31. Marschner, H., 2011. Marschner's mineral nutrition of higher plants: Academic press. London.
32. Mbah, C., Njoku, C., Okolo, C., Attoe, E., and Osakwe, U., 2017. Amelioration of a degraded Ultisol with hardwood biochar: Effects on soil physico-chemical properties and yield of cucumber (*Cucumis sativus* L). *African Journal of Agricultural Research*, 12, pp. 1781-1792 .<https://doi.org/10.5897/AJAR2016.11654>
33. Molla, M. S., Akhter, M., Maniruzzaman, M., Lipi, N. J., Rabiul, A., and Tisam, A., 2017. Response of biochar to plant nutrients and yield of *Amaranthus tricolor*. *International Journal of Innovative Research*, 2, pp.13–17.
34. Nelson, D. W., and Sommers, L. E., 1983. Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis: Part 2 chemical and microbiological properties*, 9, pp. 539-579 .<https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c29>

35. Olama, V., Ronaghi, A., Karimian, N., Yasrebi, J., Hamidi, R., and Tavajjoh, M., 2014. Comparison of yield, yield components and seed quality (oil and protein content) of two rapeseed cultivars as affected by different levels of soil-applied nitrogen and zinc. *Isfahan University of Technology*, 4, pp. 83-98. (in Persian).
36. Olsen, SR., and Sommer, LE., 1982. Phosphorus. pp. 403-430. In: A.L. Page R.H. Miller and D.R. Keeney eds. *Methods of Soil Analysis: Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. SSSA, Madison, WI.
37. Pourmansour, S., and Razaghi, F., 2016. The effect of different levels of biochar and low irrigation on the efficiency of water use in beans. *2nd Iranian National Congress of Irrigation and Drainage*. Isfahan, Iran. (in Persian). <https://sid.ir/paper/874046/fa>
38. Park, J. H., Choppala, G. K., Bolan, N. S., Chung, J. W., and Chuasavathi, T., 2011. Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals. *Plant and Soil*, 348, pp. 439-451. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0948-y>
39. Prendergast-Miller, M. T., Duvall, M., and Sohi, S. P., 2011. Localisation of nitrate in the rhizosphere of biochar-amended soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 43, pp. 2243-2246. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.07.019>
40. Prendergast-Miller, M., Duvall, M., and Sohi, S., 2014. Biochar–root interactions are mediated by biochar nutrient content and impacts on soil nutrient availability. *European Journal of Soil Science*, 65, pp. 173-185. <https://doi.org/10.1111/ejss.12079>
41. Price, G. 2006. *Australian Soil Fertility Manual*: CSIRO publishing.
42. Reyhanitabar, A., Frahadi, E., Ramezanzadeh, H., Oustan, S., 2020. Effect of pyrolysis temperature and feedstock sources on physicochemical characteristics of biochar. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 22:547–561
43. Rhoades, J. 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical Methods*, 5, pp. 417-435. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c14>
44. Shaban, M. R., and Razzaghi F., 2017. The effect of different levels of biochar, low irrigation and salinity on water use efficiency and wheat yield in greenhouse conditions. *14th National Conference on Irrigation and Evaporation Reduction*, Shahid Bahonar University of Kerman. (In Persian). <https://civilica.com/doc/693417>
45. Shahbazi, K., and Besharati, H., 2013. Overview of Agricultural Soil Fertility Status of Iran. *Land Management Journal*, 1, pp. 1-15. (in Persian).
46. Shu, L., Schneider, P., Jegatheesan, V., and Johnson, J., 2006. An economic evaluation of phosphorus recovery as struvite from digester supernatant. *Bioresource Technology*, 97, pp. 2211-2216. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.11.005>
47. Siavash, B., Carapetian, Z., and Zare, S., 2005. Studying on lipid content and fatty acids in some varieties of colza (*Brassica napus* L.). *Pajouhesh-va-sazandegi, in agronomy and horticulture*, 18, pp. 95-101. (In Persian). <https://sid.ir/paper/19601/en>
48. Singh, B., Camps-Arbestain, M., and Lehmann, J., 2017. *Biochar: a guide to analytical methods*: Csiro Publishing.
49. Singh, D. K., and Sale, P. W., 2000. Growth and potential conductivity of white clover roots in dry soil with increasing phosphorus supply and defoliation frequency. *Agronomy Journal*, 92, pp. 868-874. <https://doi.org/10.2134/agronj2000.925868x>
50. Song, W., and Guo, M., 2012. Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 94, pp. 138-145. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.11.018>
51. Steiner, C., Das, K., Melear, N., and Lakly, D., 2010. Reducing nitrogen loss during poultry litter composting using biochar. *Journal of Environmental Quality*, 39, pp. 1236-1242. <https://doi.org/10.2134/jeq2009.0337>
52. Sun, C., Chen, X., Cao, M., Li, M., and Zhang, Y., 2017. Growth and metabolic responses of maize roots to straw biochar application at different rates. *Plant and Soil*, 416, pp. 487-502. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3229-6>
53. Takaragawa, H., Yabuta, S., Watanabe, K., and Kawamitsu, Y., 2017. Effects of application of bagasse-and sunflower residue-derived biochar to soil on growth and yield of oilseed sunflower. *Tropical Agriculture and Development*, 61, pp. 32-39

- . <https://doi.org/10.11248/jsta.61.32>
54. Tavajjoh, M., Karimian, N., Ronaghi, A., Yasrebi, J., Hamidi, R., and Olama, V., 2016. Yield, yield components and seed quality of two rapeseed cultivars as affected by different levels of phosphorus and boron under greenhouse conditions. *Journal of Soil and Plant Interactions-Isfahan University of Technology*, 6, pp. 99-113. (In Persian). <https://doi.org/10.18869/acadpub.ejgcst.6.4.99>
55. Thomas, G. W. 1996. Soil pH and soil acidity. *Methods of Soil Analysis: part 3 Chemical Methods*, 5, pp. 475-490 . [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(97\)00134-5](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(97)00134-5)
56. Thomsen, I. K., and Christensen, B. T., 1998. Cropping system and residue management effects on nitrate leaching and crop yields. *Agriculture ,Ecosystems and Environment*, 68, pp. 73-84 . <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c16>
57. Uzoma, K., Inoue, M., Andry, H., Zahoor, A., and Nishihara, E., 2011. Influence of biochar application on sandy soil hydraulic properties and nutrient retention . *Journal of Food, Agriculture and Environment*. 9(3): 1137-1143.
58. Wang, T., Camps-Arbestain, M., and Hedley, M., 2014. The fate of phosphorus of ash-rich biochars in a soil-plant system. *Plant and Soil*, 375, pp. 61-74 . <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1938-z>
59. Wang, T., Camps-Arbestain, M., Hedley, M., and Bishop, P., 2012. Predicting phosphorus bioavailability from high-ash biochars. *Plant and Soil*, 357, pp. 173-187 . <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1131-9>

مدل سازی عوامل مؤثر بر تمایل کشاورزان نسبت به اجرای طرح یکپارچه سازی

اراضی

مسلم سواری* , آمنه سواری ممبئی و ابوالمحمد بندری

دانشیار گروه ترویج و آموزش کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاتانی، ایران.

Savari@asnrukh.ac.ir

دکتری ترویج کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاتانی، ایران.

amenehsavari@yahoo.com

دانشجوی دکتری ترویج کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاتانی، ایران.

bondori@asnrukh.ac.ir

دریافت: دی ۱۴۰۳ و پذیرش: تیر ۱۴۰۴

چکیده

پژوهش حاضر با هدف مدل سازی عوامل مؤثر بر افزایش تمایل کشاورزان نسبت به اجرای طرح یکپارچه سازی اراضی با استفاده از تئوری رفتار برنامه ریزی شده انجام گردید. برای رسیدن به هدف تحقیق از روش توصیفی-همبستگی و مبتنی بر مدل معادلات ساختاری استفاده گردید. جامعه آماری شامل کشاورزان بخش میان آب شهرستان شوشتر بودند ($N=1400$). حجم نمونه با استفاده از جدول کرجسی و مورگان ۳۰۱ نفر تعیین شد و نمونه گیری نیز به روش طبقه ای - تصادفی انجام شد. ابزار جمع آوری داده ها پرسشنامه بوده که روایی آن بر اساس نظر اعضای هیأت علمی دانشگاه و پایایی آن از طریق آلفای کرونباخ تأیید شد. همچنین به منظور تعیین روایی سازه از شاخص میانگین واریانس استخراج شده (AVE) و برای تعیین پایایی مدل از شاخص پایایی ترکیبی (CR) و شاخص پایایی همگونی (Rho) استفاده شد. داده ها با استفاده از نرم افزارهای SPSS²⁶ و Smart PLS³ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج مدل معادلات ساختاری نشان داد که متغیرهای نگرش، هنجارهای ذهنی و کنترل رفتاری درک شده ۶۳ درصد از تغییرات متغیر تمایل کشاورزان نسبت به اجرای طرح یکپارچه سازی اراضی را پیش بینی کردند. بر اساس نتایج به دست آمده از این پژوهش، نگرش و هنجارهای ذهنی کشاورزان ۴۷ درصد تغییرات کنترل رفتاری درک شده و متغیر هنجار ذهنی ۳۷ درصد تغییرات نگرش کشاورزان نسبت به اجرای طرح یکپارچه سازی اراضی را تبیین می کنند.

واژه های کلیدی: کشاورزان، یکپارچه سازی اراضی، نگرش، هنجار ذهنی، کنترل رفتاری درک شده

* -آدرس ایمیل نویسنده مسئول: Savari@asnrukh.ac.ir

نوع مقاله: پژوهشی



مقدمه

در جوامع روستایی کشاورزی به‌عنوان منبع اصلی امرار معاش روستاییان بوده و زندگی کشاورزان به آن متکی است (Gedefaw et al., 2019)؛ اما متأسفانه امروزه پدیده قطعه قطعه بودن اراضی به‌عنوان یکی از موانع جدی توسعه کشاورزی گریبان‌گیر اراضی کشاورزی شده است. کوچکی و پراکندگی اراضی، مانع استفاده بهینه از آب، زمین، نیروی انسانی، مکانیزاسیون و دیگر عوامل مؤثر در تولید کشاورزی است (Sharifi et al., 2019). توسعه نوسازی کشاورزی متکی به زمین‌های کشاورزی در مقیاس بزرگ‌تر و افزایش کاربرد مکانیزاسیون، بخش جدایی‌ناپذیر برنامه‌های توسعه روستایی است (Liu et al., 2023; Tran et al., 2022).

پس از جنگ جهانی دوم موضوع اصلاحات ارضی در بسیاری از کشورهای جهان اهمیت زیادی به خود گرفت و با سرعت بیشتری دنبال شد (La Croix, 2015). نتیجه اصلاحات ارضی و خصوصی‌سازی زمین در بسیاری از کشورها در اروپا و آسیای مرکزی، تقسیم بیش از حد زمین و کوچک شدن مزارع بوده است و خوشبختانه حاکمیت‌ها ضرورت رسیدگی به این مشکل ساختاری را تشخیص داده‌اند. این امر منجر به معرفی ابزارهای مدیریت زمین مانند یکپارچه‌سازی اراضی شده است (Hartvigsen et al., 2019). یکپارچه‌سازی اراضی به‌عنوان یک ابزار مفید برای بهبود کمیت و کیفیت تولیدات کشاورزی در نظر گرفته می‌شود (Hong et al., 2020).

یکپارچه‌سازی اراضی یک ابزار مؤثر برای بهینه‌سازی منابع زمین و بهبود کارایی استفاده از زمین در مناطق فقیرنشین در نظر گرفته می‌شود (Wang et al., 2021; Li et al., 2023) و جایگاه مهمی در توسعه پایدار روستایی و اقتصاد کشاورزی دارد (Ertunç et al., 2023). هدف از اجرای طرح یکپارچه‌سازی اراضی افزایش ایده‌آل بهره‌وری و سودآوری کشاورزی بر اساس اصول مدرن کشاورزی در آن دسته از اراضی است که به دلایل مختلف باریک و تکه‌تکه شده‌اند (Uyan et al., 2023).

(Ertunç & Uyan, 2022). علاوه بر این، اجرای پروژه‌های یکپارچه‌سازی اراضی منجر به حفاظت از مناطق روستایی، بهبود کیفیت زندگی کشاورزان، افزایش بهره‌وری و انجام اقدامات فنی، اقتصادی و اجتماعی می‌شود (Ertunç et al., 2023). در ایران از سال ۱۳۹۷ تا سال ۱۴۰۲ فقط حدود ۱۰۰۰ هکتار از اراضی کشاورزی تجمیع شده بود که در سال ۱۴۰۲ با اجرای طرح هر شهرستان یک پایلوت برای تجمیع و یکپارچه‌سازی و ابلاغ آن از سوی وزیر جهاد کشاورزی به روسای سازمان جهاد کشاورزی استان‌ها حدود ۴۲۳ پایلوت تاکنون در کشور معرفی شده است که این طرح حدود ۱۷۰ هزار هکتار از اراضی را در بر می‌گیرد. از سال ۱۴۰۲ تاکنون حدود ۱۷ هزار و پانصد هکتار از اراضی کشاورزی تجمیع و یکپارچه‌سازی شده است. به‌عنوان مثال در سطح استان فارس ۳۰۰۰ هکتار اراضی کشاورزی یکپارچه شده و ۱۰۰۰۰ هکتار نیز در دست مطالعه است؛ در سطح استان زنجان نیز ۷۹۸ هکتار از اراضی یکپارچه‌سازی شده است. بنابراین، اگرچه یکپارچه‌سازی اراضی با هدف حل مشکل وجود قطعات پراکنده کشاورزی و یا به حداقل رساندن تعداد آن‌ها سابقه طولانی دارد، اما به دلیل وجود مشکلات اجتماعی، اقتصادی و فنی و عدم جامع‌نگری، برنامه‌های یکپارچه‌سازی به اهداف مورد نظر خود دست نیافته‌اند. مشکل خردی و پراکندگی اراضی کشاورزی، اکنون به یک چالش بزرگ در کشور تبدیل شده است که بایستی چاره‌ای برای آن اندیشیده شود. در غیر این صورت، اثرات منفی اجتماعی، اقتصادی و محیط زیستی آن از جمله مهاجرت، بیکاری، خالی از سکنه شدن روستاها، ناامنی غذایی و تغییر کاربری اراضی کشاورزی تشدید خواهد شد. اقتصاد منطقه مورد مطالعه یعنی بخش میاناب بر محور کشاورزی شکل گرفته و در این میان، کشت شلتوک نقش مهمی را ایفا می‌کند. اهمیت غذا در استقلال ملت‌ها و روند صعودی رشد جمعیت، نیاز روزافزون به مواد غذایی به‌عنوان یک ضرورت ملی، موجب شده تا تأمین مواد غذایی در برنامه ریزی‌های کلان، مورد تأکید قرار گیرد تحقق این مهم به

نحوه فعالیت سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان کشور در سطح ملی و منطقه‌ای بستگی دارد. لذا در وهله‌ی نخست، حفظ وضعیت موجود، حائز اهمیت فراوان است بوده پس از آن در جهت ارتقاء و بهبود کشاورزی پایدار منطقه با تدوین الگوی کشت مناسب می‌بایست همت گمارد که در این راستا، طرح تجهیز و نوسازی و یکپارچه‌سازی اراضی کشاورزی نقش به سزایی دارد.

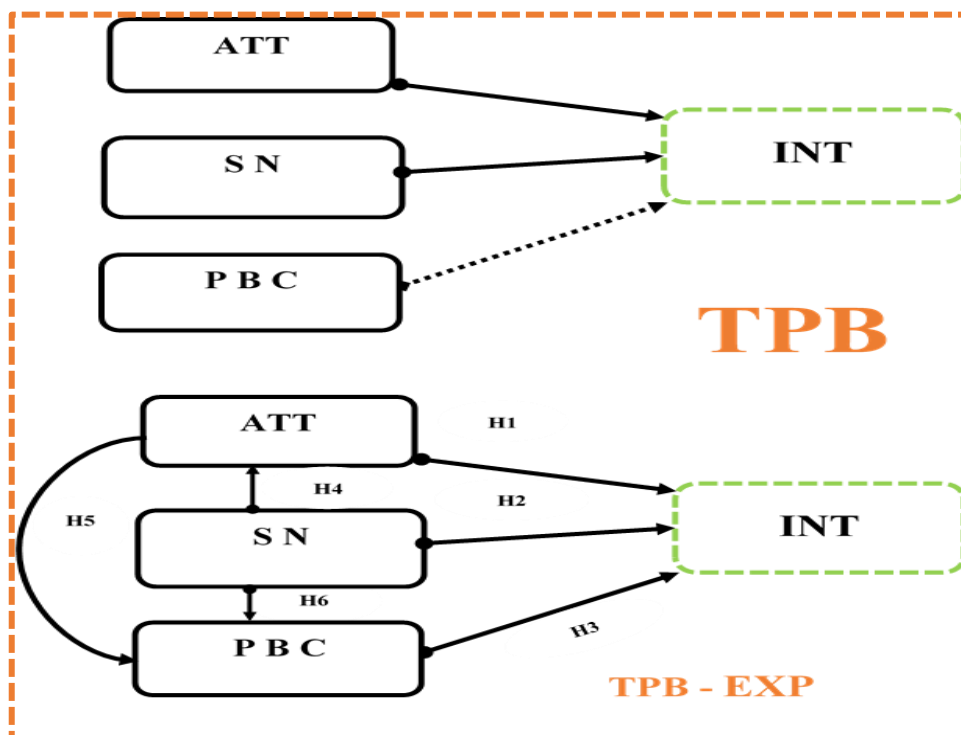
یکپارچه‌سازی اراضی یک محرک مهم اما بحث‌برانگیز برای بازسازی روستایی است (Tong et al., 2020)؛ بنابراین هدف اساسی این مطالعه شناسایی عوامل مؤثر بر افزایش تمایل کشاورزان نسبت به یکپارچه‌سازی اراضی است تا به برنامه‌ریزان کمک نماید با تلاش در جهت تقویت عوامل مثبت، گرایش کشاورزان را به این امر افزایش داده و گام‌های سازنده‌ای در جهت جلوگیری از خرد شدن بیشتر اراضی بردارند. این نتایج باعث خواهد شد تا بهره‌بردان تمایل بیشتری به فعالیت‌های گروهی و تعاونی پیدا نموده، یکجا کشتی را در اراضی پیاده‌سازی کرده و با رعایت اصول مربوط افزایش درآمد از این بخش را برای خود به ارمغان آورند.

دهه‌هاست که محققان در جستجوی متغیرهایی هستند که بر رفتار تأثیر می‌گذارند و متغیرهایی را که بیشترین تأثیر را بر رفتار دارند، شناسایی می‌کنند (Strydom, 2018; Bayranvand et al., 2025; Savari & Khaleghi, 2025; Savari et al., 2024a; Savari et al., 2024b). تئوری رفتار برنامه‌ریزی شده بیشترین مورد پیش‌بینی رفتار کشاورزان نسبت به سایر متغیرهای اجتماعی-اقتصادی ارائه می‌دهد (Abdulkarim et al., 2017; Greaves et al., 2013) و یکی از محبوب‌ترین مدل‌های روانشناختی اجتماعی برای درک و پیش‌بینی رفتار انسان است (Soorani & Ahmadvand, 2019; Savari et al., 2025a). این پژوهش به دنبال مدل‌سازی عوامل مؤثر بر تمایل کشاورزان نسبت به طرح یکپارچه‌سازی اراضی با استفاده از تئوری رفتار برنامه‌ریزی شده است. تئوری رفتار برنامه‌ریزی شده یک نظریه اجتماعی-روانشناختی است که بیان می‌کند رفتار

واقعی را می‌توان با نیت یا همان تمایل رفتاری بهتر پیش‌بینی کرد (Popa et al., 2019). تمایل افراد برای اقدام عمدتاً به سه عامل نگرش رفتاری، هنجارهای ذهنی و کنترل رفتاری درک شده بستگی دارد (Si et al., 2019). بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که نگرش پیش‌بینی‌کننده اصلی تمایل رفتاری است (Raziuddin & Vaithianathan, 2018) و تأثیر اساسی بر رفتار دارد و اغلب رفتارها تحت تأثیر نگرش است. در اغلب مطالعات، این مؤلفه به‌عنوان متغیری مهم و شایان توجه در برنامه‌ریزی تغییر رفتار سنجیده و به آن توجه می‌شود (Eldredge et al., 2016; Savari et al., 2025b). نگرش نسبت به یک رفتار نشان‌دهنده‌ی بستری است که در آن، یک شخص ارزیابی مطلوب یا نامطلوبی از آن رفتار دارد (Ullah et al., 2021). سازه دیگر این نظریه هنجار ذهنی یا فشار اجتماعی درک شده برای مواجه‌شدن یا نشدن با یک رفتار است. هنجارهای ذهنی به‌عنوان فشار یا نفوذ اجتماعی افراد در مواجهه با یک انتخاب رفتاری است (Sánchez et al., 2018) و ترکیبی از درک فرد از فشارهای اجتماعی برای انجام عمل و انگیزه آن‌ها برای سازگاری است (Holt et al., 2021). سازه کنترل رفتاری درک شده به‌عنوان سومین عامل تعیین‌کننده تمایل به انجام رفتار به درک فرد از آسانی و سختی انجام رفتار مربوط است (Empidi & Emang, 2021; Shokati Amghani et al., 2023). به عبارت دیگر کنترل رفتاری درک شده به سهولت یا دشواری درک شده و در نهایت انجام یک رفتار خاص اشاره دارد (Sánchez, 2018; Savari et al., 2023; Savari et al., 2024c). با توجه به مطالب ذکرشده و در راستای هدف کلی تحقیق فرضیات زیر در قالب چارچوب نظری پژوهش (نگاره ۱) در نظر گرفته شده است.

- ۱- نگرش کشاورزان بر تمایل رفتاری آنان جهت طرح یکپارچه‌سازی اراضی تأثیر دارد.
- ۲- هنجارهای ذهنی کشاورزان بر تمایل رفتاری آنان جهت طرح یکپارچه‌سازی اراضی تأثیر دارد.

- ۳- کنترل رفتاری درک شده کشاورزان در تمایل رفتاری آنان جهت طرح یکپارچه‌سازی اراضی تأثیر دارد.
- ۴- هنجارهای ذهنی کشاورزان بر نگرش کشاورزان نسبت به طرح یکپارچه‌سازی اراضی تأثیر دارد.
- ۵- نگرش کشاورزان بر کنترل رفتاری درک شده کشاورزان نسبت به طرح یکپارچه‌سازی اراضی تأثیر دارد.
- ۶- هنجارهای ذهنی کشاورزان بر کنترل رفتاری درک شده کشاورزان نسبت به طرح یکپارچه‌سازی اراضی تأثیر دارد.



شکل ۱- چارچوب مفهومی تحقیق
Figure 1- Conceptual framework of the study (TPB, XEP-TPB ATT (Attitude), INT (Intention), SN (Subjective Norms), PBC (Perceived Behavioural Control))

منابع آب و غیره از اصلی‌ترین دلایل مخالفت کشاورزان با اجرای طرح یکپارچه‌سازی اراضی است.

تاجری مقدم و همکاران (Tajeri Moghadam et al., 2016) سنجش مقدار تمایل کشاورزان نسبت به مشارکت در طرح یکپارچه‌سازی اراضی در بخش مرکزی شهرستان ارزوئیه استان کرمان را مورد بررسی قرار دادند. یافته‌های حاصل از پژوهش نشان داد که ۵۴ درصد کشاورزان به مقدار زیادی تمایل داشتند در طرح یکپارچه‌سازی اراضی شرکت کنند. تمایل ۲۷/۶ درصد از آنها نیز در سطح متوسط و ۱۷/۲ درصد آنها در سطح کم طبقه‌بندی شد. همچنین نتایج به دست آمده از تحلیل رگرسیون چندگانه گام‌به‌گام نشان دادند که متغیرهای مقدار آگاهی از طرح یکپارچه‌سازی اراضی، تحصیلات و تعداد قطعات

شهابی نژاد و همکاران (Shahabinejad et al., 2015) مهم‌ترین عوامل مؤثر بر مشارکت در طرح یکپارچه‌سازی اراضی را در بخش میمه‌ای استان اصفهان، سطح زیر کشت، تعداد قطعات زمین زراعی و آگاهی کشاورزان از مزایای طرح یکپارچه‌سازی دانستند. احمدپور و همکاران (Ahmadpour et al., 2015) در بررسی عوامل مؤثر بر عدم مشارکت شالیکاران استان مازندران در طرح یکپارچه‌سازی اراضی به این نتیجه رسیدند خردی و دوری اراضی کشاورزی از موانع جدی توسعه کشاورزی است، همچنین نتایج نشان داد احتمال کم شدن مقدار زمین زراعی بعد از یکپارچه‌سازی، عدم تحویل به‌موقع اراضی زراعی یکپارچه‌شده و تفاوت مزارع از لحاظ دسترسی به

زمین زراعی قادر به تبیین ۶۰ درصد از تغییرات متغیر تمایل کشاورزان به مشارکت در طرح یکپارچه‌سازی اراضی بودند.

بخشی و رزقی (Bakhshi and Rezqi, 2018) در تحقیق خود با عنوان واکاوی عوامل بازدارنده و پیش‌برنده‌ی مشارکت کشاورزان در اجرای طرح یکپارچه‌سازی اراضی زراعی (مورد مطالعه: روستاهای شهرستان نهبندان) نشان دادند بین متغیر تمایل به مشارکت در یکپارچه‌سازی اراضی و متغیرهای سابقه‌ی فعالیت کشاورزی، میزان مالکیت اراضی، تعداد قطعات زراعی، متوسط اندازه‌ی قطعات، سطح زیر کشت، فاصله‌ی اراضی تا منبع آب، فاصله‌ی اراضی تا روستا، میزان اعتماد مقابل کشاورزان به یکدیگر، میزان آگاهی پیرامون یکپارچه‌سازی اراضی و میزان حمایت‌های اعتباری دولت از اجرای طرح همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود دارد. بر اساس یافته‌های تحلیل عاملی، ۷۱/۷۵ درصد از واریانس کل عوامل بازدارنده و پیشران یکپارچه‌سازی اراضی را هشت عامل زراعی، اعتباری حمایتی، سازمانی، اقتصادی، روان‌شناختی، انگیزشی، آموزشی ترویجی و قانونی تبیین می‌نمایند.

بخش مقدم و همکاران (Bakhshi et al., 2022) در واکاوی و تحلیل عوامل مؤثر بر موفقیت طرح یکپارچه‌سازی اراضی کشاورزی دهستان چویر سه عامل مؤثر در اجرای طرح یکپارچه‌سازی اراضی و موفقیت آن مشخص شدند که بدین‌صورت نامگذاری شدند ۱- عامل فناوری‌های نوین کشاورزی با وزن عاملی ۱/۷؛ ۲- دومین عامل تأثیرگذار شامل شاخص‌های بهره‌وری و اشتغال و عامل زیربنایی بوده که عامل مدیریت و بهره‌وری را با وزن عاملی ۱/۶۶ تشکیل می‌دهد ۳- سومین عامل تأثیرگذار از دیدگاه کارشناسان، عامل مکانیزاسیون با بار عاملی ۱/۴۶۴ است که از شاخص‌های به‌کارگیری ماشین‌آلات و سهولت دسترسی به ماشین‌آلات و نیروی کار به دست آمده است.

کولیس و همکاران (Kolisi et al., 2015) در تحقیق خود در زمینه یکپارچه‌سازی اراضی فنلاند به این

نتیجه رسیدند که یکپارچه‌سازی اراضی سودآوری بالایی دارد. عوامل اصلی مؤثر بر این سودآوری شامل صرفه‌جویی در هزینه، افزایش برداشت محصول و کاهش تخریب محیط زیست است. موفقیت طرح یا برنامه‌ای در زمینه توسعه روستا و کشاورزی در گرو انجام پژوهش‌هایی در جریان طرح‌ها است.

دیراک و همکاران (Derak et al., 2017) در تحلیل اثرات یکپارچه‌سازی اراضی کشاورزی (با توجه به تجزیه و تحلیل چند معیاری) در اراضی زراعی مراکش به این نتیجه رسیدند در اراضی زراعی مراکش، می‌توان ادعا نمود که آثار اقتصادی یکپارچه‌سازی اراضی در زندگی کشاورزان و توسعه کشاورزی دارای اهمیت فراوان است که این مهم در این پژوهش مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

گیسیز و همکاران (Gessesse et al., 2018) در مطالعه‌ی خود شبکه‌های اجتماعی را ابزار مفیدی برای بهبود آگاهی، ادراک و تصمیمات پذیرش یکپارچه‌سازی اراضی در بین کشاورزان عنوان کردند.

کوربیلل-ریکو و همکاران (Corbelle-Rico et al., 2018) در بررسی آثار یکپارچه‌سازی اراضی با استفاده از سیستم تصمیم‌گیری چند معیاره با هدف حفاظت از مزارع در کشورهای اروپایی به این نتیجه رسیدند که مدل‌های تصمیم‌گیری به استفاده‌کنندگان این را اجازه می‌دهد که با در نظر گرفتن تقاضا اراضی را رتبه‌بندی نموده و بهترین استفاده از زمین‌ها را داشته باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

تحقیق حاضر با هدف بررسی عوامل مؤثر بر تمایل کشاورزان نسبت به طرح یکپارچه‌سازی اراضی در میان کشاورزان شهرستان شوشتر در استان خوزستان جنوب غربی ایران انجام گرفت. شوشتر، شهری تاریخی در شمال استان خوزستان و در ۹۲ کیلومتری مرکز استان، شهر اهواز است. شوشتر بین ۴۸ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۱۲

دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ و ۳۱ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۲۶ دقیقه عرض شمالی از خط استوا قرار گرفته است (Mazhary & Poodat, 2019). میانگین بارندگی سالیانه منطقه طبق آمار هواشناسی ۳۲۲ میلی‌متر است. شهرستان شوشتر و به‌خصوص بخش میان‌آب به‌عنوان یکی از قطب‌های مهم کشاورزی در استان خوزستان محسوب می‌شود. عمده محصولات زراعی از جمله برنج، گندم، ذرت، چغندر قند، نیشکر، دانه‌های روغنی و غیره کشت می‌شود.

انتخاب نمونه

روش این تحقیق پیمایشی و از نوع توصیفی همبستگی است جهت جمع‌آوری داده‌ها از پرسشنامه استفاده گردید. ابزار تحقیق پرسشنامه بود که شامل پنج بخش خصوصیات جمعیت‌شناختی و سازه‌های تحقیق شامل نگرش کشاورزان با هفت گویه، هنجار ذهنی با شش گویه، کنترل رفتاری درک شده با شش گویه، تمایل جهت یکپارچه‌سازی اراضی با هفت گویه و با مقیاس پنج درجه-ای لیکرت (کاملاً مخالفم = ۱، کاملاً موافقم = ۵) استفاده شد. جامعه آماری شامل کشاورزان سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲، بخش میان‌آب شهرستان شوشتر بودند (N=۱۴۰۰). حجم نمونه با استفاده از جدول گرجسی و مورگان ۳۰۱ نفر تعیین شد و با استفاده از روش نمونه‌گیری طبقه‌ای تصادفی مورد مطالعه قرار گرفتند. پس از تکمیل پرسشنامه، داده‌های جمع‌آوری شده موجود در پرسشنامه کدگذاری گردید توسط نرم‌افزار SPSS²⁶، PLS³، Smart مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفتند. برای توصیف و تحلیل داده‌ها از آمار توصیفی و استنباطی استفاده شد. در بخش توصیفی از آماره‌های توزیع فراوانی، میانگین و انحراف معیار در بخش استنباطی نیز برای اندازه‌گیری تأثیر متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته از آزمون‌های تفاوت میانگین، ضریب همبستگی و الگوی معادلات ساختاری و تحلیل مسیر برای آزمون فرضیات مورد استفاده شد. زمانی که از الگوی معادلات ساختاری در نرم‌افزار Smart, PLS³

استفاده می‌شود، محققان معمولاً به‌منظور ارزیابی این برازش از شاخص‌های نیکویی برازش استفاده می‌کنند، برای بررسی برازش مدل کلی از تنها یک معیار به نام Googness of Fit (GOF) استفاده می‌شود. شاخص نیکویی برازش مدل، (GOF)، سازش بین کیفیت مدل ساختاری و مدل اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد و برابر است با:

$$GOF = \sqrt{\text{communalities} \times R^2}$$

(۱)

در آن میانگین مقادیر اشتراک Communalities و Coefficient of Determination (R^2) معیار GOF مربوط به بخش کلی مدل‌های معادلات ساختاری است که توسط این معیار محقق می‌تواند پس از بررسی برازش بخش اندازه‌گیری و بخش ساختاری مدل کلی پژوهش خود، برازش بخش کلی را نیز کنترل نماید. سه مقدار ۰/۰۱، ۰/۲۵، ۰/۳۶ به‌عنوان مقادیر ضعیف، متوسط و قوی برای GOF معرفی شده است (Wetzels et al., 2009). مقدار شاخص برازش در این پژوهش ۰/۵۷ است که نشان‌دهنده برازش کلی قوی مدل است جدول (۱). پایایی مدل با استفاده از ضرایب آلفای کرونباخ و شاخص پایایی ترکیبی (CR) بالای ۰/۷ بهره گرفته شده است که بیانگر میزان شدت کنترل خطاهای اندازه‌گیری در مدل معادلات ساختاری است (Hulland, 1999). به‌منظور تعیین روایی سازه نیز شاخص میانگین واریانس استخراج‌شده (AVE) محاسبه شد که طبق نظر فورنل و لارکر، استاندارد بالای ۰/۵ برای این میانگین واریانس توسعه‌یافته مناسب است (Fornell & Larcker, 1981). این شاخص نشان می‌دهد که چه درصدی از واریانس مؤلفه مورد مطالعه تحت تأثیر نشانگرهای آن بوده است مک‌کنزی و همکاران (MacKenzie et al., 2005) مقدار ۰/۴ را به بالا برای AVE کافی دانسته‌اند در تحقیق باقری و همکاران (Bagheri et al., 2021) مقدار ۰/۴ به بالا گزارش کرده‌اند. شاخص پایایی همگونی (Rho) نیز برای سنجش پایایی درونی سازه‌ها است. ضریب Rho نسبت به آلفای

کرونباخ از اطمینان بیشتری برخوردار است. به ضریب Goldstein نیز گفته می‌شود. مقدار این ضریب باید بیش Rho گاهی ضریب دایلون-گولداشتین Dillon- از ۰/۷ باشد (Mehmetoglu, 2012) جدول (۱).

جدول ۱- شاخص‌های روایی، پایایی و نکویی برازش مدل

متغیرها	آلفای کرونباخ	پایایی ترکیبی	rho_A	AVE	GOF
تمایل	0.949	0.958	0.950	0.767	0.57
نگرش	0.885	0.913	0.889	0.637	
هنجار ذهنی	0.916	0.935	0.921	0.707	
کنترل رفتار درک شده	0.831	0.877	0.831	0.542	

نتایج

درصد مجرد و ۶۷/۴۴ درصد متأهل بودند. با توجه به یافته‌های تحقیق ۳۴/۶ درصد کشاورزان زمین‌های بین ۵ تا ۱۰ هکتار داشتند. میانگین کل اراضی ۸ هکتار بود. از نظر میزان تحصیلات، ۸/۳ درصد بی‌سواد، ۲۸/۶ درصد دیپلم، ۱۲/۳ درصد فوق‌دیپلم و ۵۰/۸ درصد لیسانس و بالاتر بودند (جدول ۲).

مطابق تحلیل داده‌ها، میانگین سنی پاسخگویان ۳۲/۳۵ سال، بیشینه و کمینه آن به ترتیب ۸۲ و ۱۸ سال بود. بیشترین فراوانی متعلق به گروه سنی ۳۰ تا ۴۵ سال است. از مجموع پاسخگویان مورد بررسی در این پژوهش، ۳۲/۵۶

جدول ۲- ویژگی‌های جمعیت‌شناختی، اقتصادی و اجتماعی کشاورزان

متغیر	سطح	فراوانی	درصد فراوانی	میانگین	انحراف
سن (سال)	زیر ۳۰	26	8.6	32.35	8.58
	۳۰ تا ۴۵	158	52.5		
	بالای ۴۵	117	38.9		
تحصیلات	بی‌سواد	25	8.3	-	-
	دیپلم	86	28.6	-	-
	فوق‌دیپلم	37	12.3	-	-
	لیسانس و بالاتر	153	50.8	-	-
مقدار زمین دیم	زیر پنج هکتار	98	32.6	8.72	5.19
	بین ۵ هکتار تا ۱۰ هکتار	104	34.6		
	بالای ۱۰ هکتار	99	32.9		
وضعیت تأهل	مجرد	98	32.56	-	-
	متأهل	203	67.44	-	-

کشاورزان نسبت به یکپارچه‌سازی اراضی رابطه معنی‌داری در سطح یک درصد یافت شد. همچنین، بین سازه‌های مورد بررسی نیز با یکدیگر رابطه معنی‌داری در سطح یک درصد نشان دادند.

به‌منظور بررسی ارتباط بین سازه‌های پژوهش از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. با توجه به نتیجه تحلیل همبستگی (جدول ۳) بین سازه‌های نگرش، هنجارهای ذهنی، کنترل رفتاری درک شده با تمایل رفتاری

جدول ۳- همبستگی بین سازه‌های تئوری رفتار برنامه‌ریزی نسبت به یکپارچه‌سازی اراضی

متغیرها	1	2	3
تمایل	1		
کنترل رفتار درک شده	642**	1	
نگرش	693**	0.606**	1
هنجار ذهنی	703**	0.509**	665**

** معنی‌داری در سطح یک درصد

در نهایت در پژوهش حاضر برای شناسایی عوامل مؤثر بر تمایل کشاورزان نسبت به طرح یکپارچه‌سازی اراضی از مدل‌سازی معادلات ساختاری استفاده شد. یافته‌های جدول (۴) نشان می‌دهد که با توجه به فرضیه یک، نگرش کشاورزان با ضریب مسیر ($\beta=0.25$) تأثیر مثبت و معناداری بر تمایل کشاورزان نسبت به طرح یکپارچه‌سازی اراضی داشته است ($t=3.97, P<0.01$). اثر غیرمستقیم نگرش کشاورزان نسبت به طرح یکپارچه‌سازی اراضی با نقش میانجی (کنترل رفتاری درک شده کشاورزان) با ضریب ($\beta=0.21$) بر تمایل کشاورزان نسبت به طرح یکپارچه‌سازی اراضی تخمین زده شد. همچنین به استناد مدل تحقیق متغیرهای هنجار ذهنی ($t=4.59, P<0.01$)، ($\beta=0.28$) کنترل رفتاری درک شده ($t=7.01, P<0.01$) از عوامل تأثیرگذار بر تمایل رفتاری کشاورزان نسبت به طرح یکپارچه‌سازی اراضی شناخته شده‌اند؛ بنابراین فرضیات اول، دوم و سوم این پژوهش مورد تأیید قرار گرفتند. همچنین اثر غیرمستقیم هنجار ذهنی کشاورزان نسبت به طرح یکپارچه‌سازی اراضی با نقش میانجی (کنترل رفتاری درک شده کشاورزان) با ضریب ($\beta=0.34$) بر تمایل کشاورزان نسبت به طرح یکپارچه‌سازی اراضی تخمین زده شد.

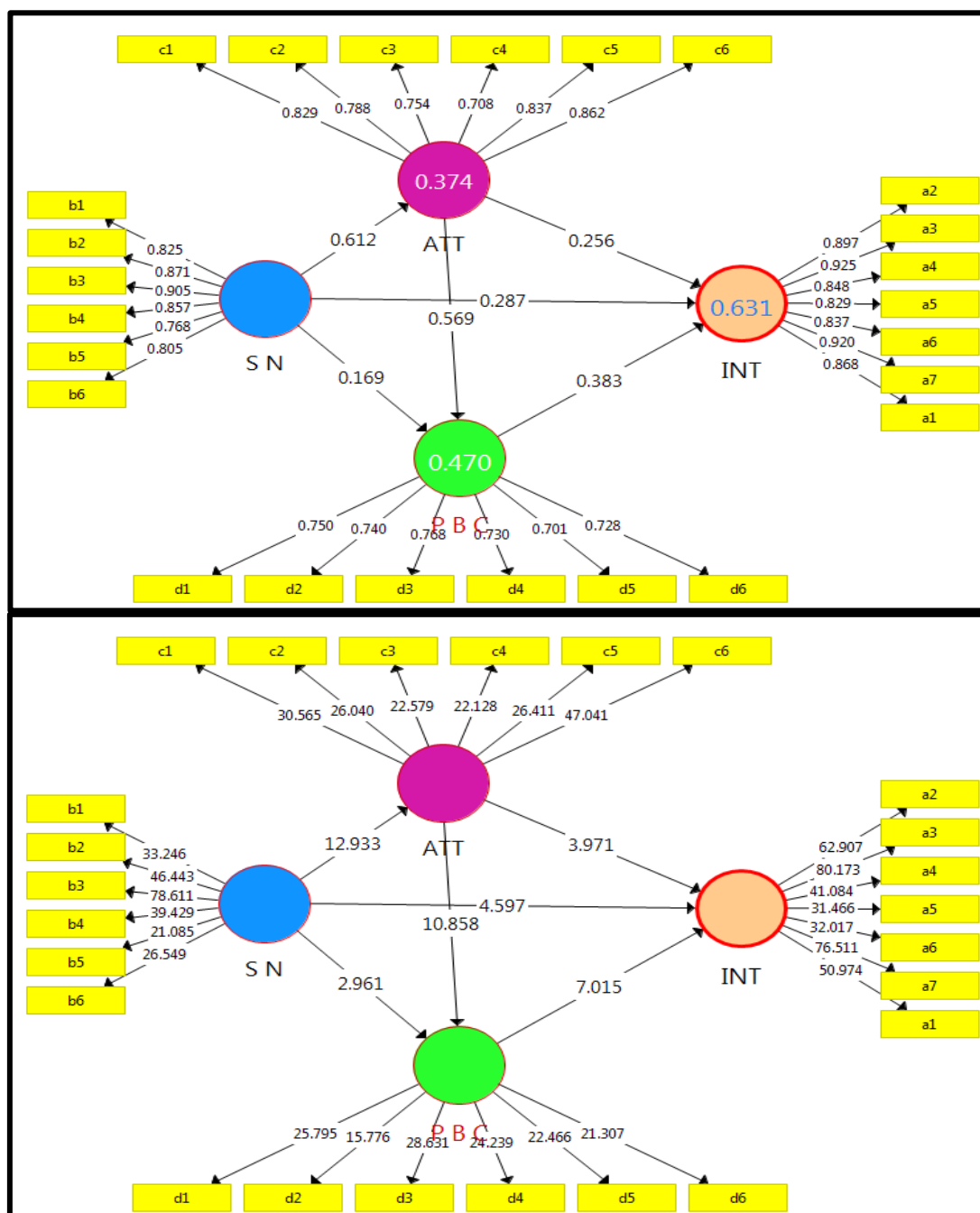
یافته‌های جدول (۴) نشان می‌دهد که با توجه به فرضیه ۴، هنجار ذهنی کشاورزان با ضریب مسیر ($\beta=0.61$) تأثیر معناداری بر نگرش کشاورزان نسبت به طرح یکپارچه‌سازی اراضی داشته است ($t=12.93, P<0.01$). طبق نتایج، نگرش کشاورزان با ضریب مسیر ($\beta=0.56$) تأثیر مثبت و معناداری بر کنترل رفتاری درک

شده کشاورزان نسبت به طرح یکپارچه‌سازی اراضی داشته است ($t=10.58, P<0.01$). یافته‌های جدول (۶) نشان می‌دهد که با توجه به فرضیه شش، هنجارهای ذهنی کشاورزان با ضریب مسیر ($\beta=0.16$) تأثیر مثبت و معناداری بر کنترل رفتاری درک شده کشاورزان نسبت به طرح یکپارچه‌سازی اراضی داشته است ($t=2.96, P<0.01$). اثر غیرمستقیم هنجار ذهنی کشاورزان نسبت به طرح یکپارچه‌سازی اراضی با نقش میانجی (نگرش کشاورزان) با ضریب ($\beta=0.34$) تخمین زده شد. بر اساس نتایج مدل برازش یافته در نمونه مورد مطالعه معادلات ساختاری استخراج شده در جدول ۶ به شرح زیر خواهد بود. بر این اساس مشخص می‌شود متغیرهای نگرش، هنجار ذهنی، کنترل رفتاری درک شده در مجموع ۶۳ درصد تغییرات تمایل رفتاری کشاورزان نسبت به طرح یکپارچه‌سازی اراضی را تشکیل می‌دهد. بر اساس نتایج به دست آمده این پژوهش نگرش و هنجار ذهنی کشاورزان ۴۷ درصد تغییرات کنترل رفتاری درک شده کشاورزان نسبت به طرح یکپارچه‌سازی اراضی را تشکیل می‌دهد و همچنین طبق یافته‌ها در جدول ۶، متغیر هنجار ذهنی ۳۷ درصد تغییرات نگرش کشاورزان نسبت به طرح یکپارچه‌سازی اراضی را تشکیل می‌دهد. شکل (۲) ساختار برازش یافته تحلیل مسیر بررسی عوامل مؤثر بر تمایل رفتاری کشاورزان نسبت به طرح یکپارچه‌سازی اراضی را نشان می‌دهد.

بر اساس نتایج به دست آمده این پژوهش، شش فرضیه پژوهش مورد تأیید قرار گرفتند (جدول ۵).

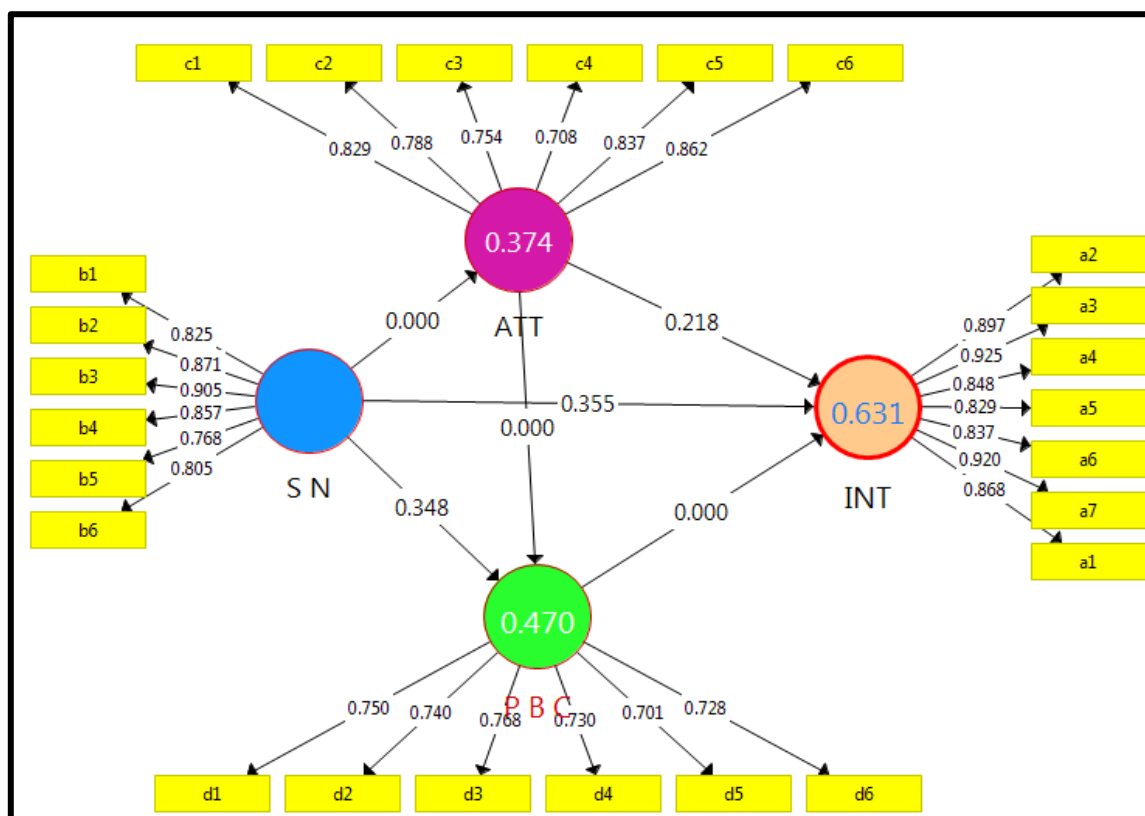
جدول ۴- اثرات مستقیم مدل سازی عوامل مؤثر بر تمایل کشاورزان نسبت به طرح یکپارچه سازی اراضی

متغیر وابسته	متغیر مستقل	اثر مستقیم	اثر غیرمستقیم	اثر کل	مقدار t	R ²
تمایل	نگرش	0.25	0.21	0.46	3.97**	0.63
	هنجار ذهنی	0.28	0.35	0.63	4.59**	
	کنترل رفتار درک شده	0.38	-	0.38	7.01**	
کنترل رفتار درک شده	نگرش	0.56	-	0.56	10.58**	0.47
	هنجار ذهنی	0.16	0.34	0.50	2.96**	
	هنجار ذهنی	0.61	-	0.61	12.93**	



شکل ۲- مدل ساختاری عوامل مؤثر بر تمایل کشاورزان نسبت به طرح یکپارچه سازی اراضی (مدل تحلیل مسیر و مقدار تی)

Figure 2- Structural model of factors affecting farmers' willingness to adopt the land consolidation plan (path analysis model and t-value)



شکل ۳- مدل ساختاری (مدل اثرات غیرمستقیم) عوامل مؤثر بر تمایل کشاورزان نسبت به طرح یکپارچه‌سازی اراضی
Figure 3- Structural model (indirect effects model) of factors affecting farmers' willingness to adopt the land consolidation plan

جدول ۵- نتایج به‌دست‌آمده در رابطه با آزمون فرضیه‌های تحقیق بر اساس مدل ساختاری

Table 5- The results obtained in relation to the test of the research hypotheses based on the structural model

نتیجه آزمون	سطح معنی‌داری	ضرایب رگرسیونی استاندارد	فرضیه تحقیق
تأیید فرضیه	0.001	0.25	نگرش ← تمایل رفتاری (H1)
تأیید فرضیه	0.001	0.28	هنجارهای ذهنی ← تمایل رفتاری (H2)
تأیید فرضیه	0.001	0.38	کنترل رفتاری درک شده ← تمایل رفتاری (H3)
تأیید فرضیه	0.001	0.61	هنجارهای ذهنی ← نگرش (H4)
تأیید فرضیه	0.001	0.56	نگرش ← کنترل رفتاری درک شده (H5)
تأیید فرضیه	0.001	0.16	هنجارهای ذهنی ← کنترل رفتاری درک شده (H6)

بحث و نتیجه‌گیری

موفقیت و اثربخشی پروژه‌های عمرانی و طرح‌های متفاوتی که توسط دولت یا بخش خصوصی در مناطق روستایی برنامه‌ریزی و اجرا می‌شود به عوامل مختلفی بستگی دارد. در سالیان اخیر نقش و جایگاه کشاورزان و روستائینان به‌عنوان یکی از مهم‌ترین این

عوامل، با جدیت بیشتری مورد توجه مسئولین و برنامه‌ریزان توسعه روستایی قرار گرفته است. کشاورزان اصلی‌ترین و مؤثرترین عامل در زمینه توسعه یکپارچه‌سازی اراضی می‌باشند و هر تصمیمی که کشاورزان اتخاذ می‌کنند در رفتار آنان انعکاس می‌یابد و این رفتار تحت تأثیر متغیرهای ساختاری (پیش‌گویی‌کننده) و میانجی است

(Wheelock et al., 1993)؛ بنابراین هدف این تحقیق واکاوی سازه‌هایی است که می‌توانند بر افزایش تمایل رفتاری کشاورزان نسبت به اجرای طرح یکپارچه‌سازی اراضی مؤثر باشند.

مطابق با نتایج به‌دست‌آمده، نگرش، یک متغیر مهم در پیش‌بینی تمایل کشاورزان نسبت به اجرای طرح یکپارچه‌سازی اراضی است. شواهد نشان می‌دهد روش‌های رسمی یکپارچه‌سازی اراضی که نگرش و دیدگاه کشاورزان را نادیده می‌گیرند با احتمال بیشتری دارد با شکست مواجه می‌شوند. یکی از مهم‌ترین عامل‌ها در موفقیت برنامه‌های یکپارچه‌سازی اراضی و پایداری آن در آینده، مداخله و مشارکت رضایت‌بخش کشاورزان در پروژه است (Alibegi and Ghambarali, 2014). نگرش در خصوص یکپارچه‌سازی اراضی روی تصمیمات و رفتارهای کشاورزان در خصوص پذیرش یا عدم پذیرش یکپارچه‌سازی نقش مهمی داشته و در میان عوامل بی-شماری که روی تمایل به این موضوع تأثیرگذار هستند به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل شناخته می‌شود. نگرش یکی از مفاهیم روانشناسی اجتماعی است که ترکیبی از سه عنصر شناختی، عاطفی و رفتاری بوده و عامل اصلی تغییر رفتار است. ضرورت بررسی نگرش افراد از آن جهت است که به مدیران و مجریان کمک می‌کند تا از شیوه تفکر افراد درباره موضوعات مشخص مطلع شده و در صورت نیاز برنامه‌هایی را برای تغییر نگرش آنان طراحی کنند (Bagheri and Shahpasand, 2010; Amobegi and Hayati, 2009). به نظر می‌رسد در ایران سیاست‌گذاری‌ها در راستای اجرای طرح یکپارچه‌سازی اراضی، موفق نخواهد بود مگر این‌که نگرش مناسب و مثبتی نسبت به شیوه‌های اجرای این طرح، در ذهن همه کشاورزان و بهره‌برداران روستایی به وجود آید. نگرش کشاورزان بیش‌تر تحت تأثیر جامعه پذیرنده قرار می‌گیرد؛ بنابراین ارتباطات کشاورزان و تعاملات آن‌ها با اعضاء فامیل، همسایگان، دوستان و آشنایان، افراد باتجربه و سازمان‌هایی مانند سازمان جهاد کشاورزی می‌تواند روی نگرش و رفتار

تصمیم‌گیری کشاورزان جهت اجرای طرح یکپارچه‌سازی تأثیر گذارد. همچنین وسایل ارتباط‌جمعی به‌ویژه رادیو و تلویزیون از جمله عوامل مهمی هستند که در تغییر نگرش کشاورزان مؤثرند و می‌توانند با تحریک روانی مردم و ایجاد فضای همدلی، باعث تغییر نگرش آن‌ها نسبت به اجرای این طرح گردند.

نتایج مطالعه نشان داد هنجار ذهنی نیز در پیش-بینی تمایل کشاورزان نسبت به اجرای طرح یکپارچه‌سازی اراضی مؤثر است. این یافته با تئوری رفتار برنامه‌ریزی‌شده که معمولاً نشانگر تأثیر هنجارهای ذهنی بر تغییر رفتار است دارای تناسب و همسویی است به این معنی که افراد مهم زندگی فرد (به‌عنوان مثال، بستگان یا همسایگان) بر تمایل کشاورزان برای انجام یکپارچه‌سازی اراضی تأثیر می‌گذارد در اینجا میزان اهمیت دادن به نظر سایر افراد در مورد انجام فعالیت‌های یکپارچه‌سازی اراضی مورد توجه است. هنجار ذهنی در واقع تأیید یا عدم تأیید رفتار فرد توسط دیگران است. تشویق رفتار مطلوب کشاورزان توسط دیگران یا سرزنش آن‌ها به‌واسطه یا رفتار نامطلوب از سوی دیگران روی تمایل رفتاری کشاورزان تأثیر می‌گذارد، همواره در پژوهش‌های علوم اجتماعی مشاهده افراد تغییرپذیر و پیشرو در ایجاد تغییرات در فعالیت‌ها و رفتار کشاورزان بسیار تأثیرگذار است لذا به نظر می‌رسد در صورتی‌که بهره‌بردارانی در مناطق دیگر اقدامات مربوط به یکپارچه‌سازی را به انجام رسانده و از اثرات آن بهره‌برده‌اند در قالب برنامه‌ریزی‌های لازم جلساتی با بهره‌برداران محدوده داشته باشند این موضوع به گرایش هر چه بیشتر بهره‌برداران بر یکپارچه‌سازی اراضی کمک می‌نماید. همچنین در این راستا توصیه می‌شود، با شناسایی افرادی که منزلت اجتماعی بالاتری دارند مانند روحانیون، معلمان، بزرگان و ریش‌سفیدان روستا و نیز کشاورزان نمونه، از آن‌ها به‌عنوان کانال‌های ارتباطی بهره گرفت. درواقع با شناسایی و به‌روز کردن اطلاعات این دسته از بهره‌برداران، در ارتباط با فعالیت‌های یکپارچه‌سازی، زمینه را برای گسترش اطلاعات مفید در سایرین را فراهم نمود.

نتایج مطالعه نشان داد کنترل رفتاری درک شده نیز از دیگر متغیرهای مؤثر در پیش‌بینی تمایل کشاورزان نسبت به اجرای طرح یکپارچه‌سازی اراضی است. همچنین به اعتقاد بندورا متقاعد کردن مردم از طریق بحث در این زمینه که آن‌ها قادر به انجام یک فعالیت هستند، مثلاً استفاده از تشویق و تحسین کلامی می‌تواند حس کارآمدی آنان را بالا ببرد. در بعضی موارد ممکن است کشاورزان جهت همراهی و مشارکت با یک پروژه نیاز به ایجاد تغییراتی در رفتار و فعالیت‌های خود داشته باشند. مسلماً مقاومت کشاورزان جهت تغییر فعالیت‌هایی که سال‌هاست به یک شیوه خاص انجام‌شده و به نسل‌های دیگر آموزش داده شده است باعث روند کند این‌گونه تغییرات خواهد شد. لیکن مقوله یکپارچه‌سازی اراضی تنها نیازمند ایجاد یک درک درست و دیدگاه مناسب در ذهن کشاورزان از آینده‌ای نه چندان دور دارد. بهره‌بردارانی که اقدامات یکپارچه‌سازی اراضی کشاورزی را پذیرفته و اراضی خود را به‌صورت تجاری کشت می‌کنند در واقع تنها یک تصمیم درست را در زمان درست اتخاذ کرده‌اند این موضوع نیز مستلزم آگاهی بخشی و ارائه اطلاعات لازم به بهره‌برداران است. در عمل، نتایج این پژوهش به سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان جهت پیشبرد اهداف توسعه یکپارچه‌سازی اراضی و توسعه زمینه‌های لازم جهت پذیرش این موضوع توسط کشاورزان و بهره‌برداران نکاتی ارائه می‌دهد. در مرحله اول، با توجه به اهمیت نگرش بر تمایل و کنترل رفتاری درک شده کشاورزان، می‌توان برنامه‌های آموزشی،

تبلیغات ملی و محلی و محتوای لازم در مورد یکپارچه‌سازی اراضی را برای کشاورزان تولید کرد. این آموزش‌ها و تبلیغات می‌توانند حس قوی خودکارآمدی را در کشاورزان القا کنند اینکه هر فرد بتواند کاری را با موفقیت به انجام برساند باعث تقویت حس خودکارآمدی و دیدگاه مثبت وی خواهد شد. درعین حال، سازمان‌های دولتی مربوطه می‌توانند گزارش‌های خاصی را به کشاورزان ارائه دهند تا پیامدهای منفی قطعه‌قطعه بودن اراضی (به‌عنوان مثال، افزایش غیرمنطقی هزینه تولید در واحد سطح، هدررفت هزینه‌ها و اتلاف زمان به دلیل آمدوشد در میان قطعات پراکنده) را برجسته و مزایای اقتصادی یکپارچه‌سازی اراضی (به‌عنوان مثال صرفه‌جویی در هزینه‌های کاشت، داشت و برداشت، صرفه اقتصادی خرید و نگهداری ماشین‌آلات و تجهیزات مکانیزاسیون) را برای تقویت احساسات پیش‌بینی‌شده مثبت در مورد یکپارچه‌سازی اراضی توضیح دهند.

تقدیر و تشکر

این مقاله بر گرفته از طرح پژوهشی مصوب در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان با شماره ۱۴۰۳/۳۲ است که با حمایت مالی این دانشگاه انجام شده است، لذا نویسندگان مراتب قدردانی خود را از این دانشگاه اعلام می‌دارند.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید نویسندگان مقاله است.

References

1. Abdulkarim, B., Yacob, M. R., Abdullahi, A. M., & Radam, A. (2017). Farmers' perceptions and attitudes toward forest watershed conservation of the North Selangor Peat Swamp Forest. *Journal of sustainable forestry*, 36(4), 309-323. <https://doi.org/10.1080/10549811.2017.1300539>
2. Ahmadpour, A., Feli, S. and Soltani, Sh. (2015). Factors affecting the non-participation of rice farmers in Mazandaran province in the land consolidation plan, *Journal of Rural and Development*, 18(2). 1-18. (In Persian).
3. Alibegi, A. Ghambarali, R. (2014). Investigating farmers' attitudes towards the effects of land consolidation in Kermanshah province: Application of Q methodology, *Iranian Journal of Agricultural Extension and Education Sciences*, 10 (1); 75-88. (In Persian)

4. Amobegi, A. Hayati, D. (2009). Land integration: a challenge for advancing rural and agricultural development projects, Third National Congress of Agricultural Extension and Education Sciences, University of Mashhad, March 11-12, Mashhad. (In Persian)
5. Bagheri, A. Shahpasand, M.R. (2010). Studying the attitude of potato farmers in the Ardabil plain towards sustainable agricultural practices, *Iranian Agricultural Economics and Development Research*, 41(2); 231-242. (In Persian)
6. Bagheri, A., Bondori, A., Allahyari, M. S., & Surujlal, J. (2021). Use of biologic inputs among cereal farmers: application of technology acceptance model. *Environment, Development and Sustainability*, 23, 5165-5181. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00808-9>
7. Bakhshi Moghadam, A., Mahmoudi, S., Hajinejad, A. (2022). Analysis of factors affecting the success of the agricultural land integration plan (example: Chobar village, Shaft county), *Scientific Journal of Geographical Studies of Coastal Areas*, 3(9), pp. 49-68. (In Persian).
8. Bakhshi, M. and Rezqi, M. (2018). Analysis of the factors inhibiting and promoting farmers' participation in the implementation of the agricultural land integration plan (case study: villages in Nehbandan County), *Geographical Studies of Arid Regions*, 9(34), pp. 25-41. (In Persian).
9. Bayranvand, M. B., Rahimian, M., Savari, M., Molavi, H., & Movahed, R. G. (2025). Predictors of ranchers' Protection Behaviors in the Use of Pastures through Protection Motivation Theory. *Rangeland Ecology & Management*, 98, 576-587. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2024.11.001>
10. Corbelle-Rico, E., Santé-Riveira, I., & Crecente-Maseda, R. (2018). A decision support system for farmland preservation: integration of past and present land use. *Spatial Analysis and Location Modeling in Urban and Regional Systems*, 173-192. 10.1007/978-3-642-37896-6_8
11. Derak, M., Cortina, J., & Taiqui, L. (2017). Integration of stakeholder choices and multi-criteria analysis to support land use planning in semiarid areas. *Land use policy*, 64, 414-428. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.03.006>
12. Eldredge, L. K. B., Markham, C. M., Ruiter, R. A., Fernández, M. E., Kok, G., & Parcel, G. S. (2016). *Planning health promotion programs: an intervention mapping approach*. John Wiley & Sons.
13. Empidi, A. V. A., & Emang, D. (2021). Understanding Public Intentions to Participate in Protection Initiatives for Forested Watershed Areas Using the Theory of Planned Behavior: A Case Study of Cameron Highlands in Pahang, Malaysia. *Sustainability*, 13(8), 4399. <https://doi.org/10.3390/su13084399>
14. Ertunç, E., & Uyan, M. (2022). Land valuation with Best Worst Method in land consolidation projects. *Land Use Policy*, 122, 106360. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106360>
15. Ertunç, E., Janus, J., & Uyan, M. (2023). Prioritization of land consolidation projects using the multi-criteria Best-Worst Method: a case study from Poland. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(9), 1045. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11712-w>
16. Fornell, C., & Larcker, D. F. (1981). Evaluating structural equation models with unobservable variables and measurement error. *Journal of marketing research*, 18(1), 39-50. <https://doi.org/10.1177/002224378101800104>
17. Gedefaw, A. A., Atzberger, C., Seher, W., & Mansberger, R. (2019). Farmer willingness to participate in voluntary land consolidation in Gozamin District, Ethiopia. *Land*, 8(10), 148. <https://doi.org/10.3390/land8100148>
18. Gessesse, A. T., Li, H., He, G., & Berhe, A. A. (2018). Study on farmer land consolidation adaptation intention: A structural equation modeling approach, the case of Sichuan province, China. *China Agricultural Economic Review*, 10(4), 666-682. <https://doi.org/10.1108/CAER-09-2016-0142>
19. Greaves, M., Zibarras, L. D., & Stride, C. (2013). Using the theory of planned behavior to explore environmental behavioral intentions in the workplace. *Journal of Environmental Psychology*, 34, 109-120. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2013.02.003>

20. Hartvigsen, M., Versinskas, T., Vidar, M., Mittic, K., Arsova, F. V., & Gorgan, M. (2019). FAO Recommendations on Land Consolidation Legislation. In *World Bank Conference on Land and Poverty, Washington, DC*.
21. Holt, J. R., Butler, B. J., Borsuk, M. E., Markowski-Lindsay, M., MacLean, M. G., & Thompson, J. R. (2021). Using the Theory of Planned Behavior to Understand Family Forest Owners' Intended Responses to Invasive Forest Insects. *Society & Natural Resources*, 34(8), 1001-1018. <https://doi.org/10.1080/08941920.2021.1924330>
22. Hong, C., Jin, X., Fan, Y., Xiang, X., Cao, S., Chen, C., & Zhou, Y. (2020). Determining the effect of land consolidation on agricultural production using a novel assessment framework. *Land Degradation & Development*, 31(3), 356-371. <https://doi.org/10.1002/ldr.3454>
23. Hulland, J. (1999). Use of partial least squares (PLS) in strategic management research: A review of four recent studies. *Strategic management journal*, 20(2), 195-204. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0266\(199902\)20:2<195::AID-SMJ13>3.0.CO;2-7](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0266(199902)20:2<195::AID-SMJ13>3.0.CO;2-7)
24. Kolis, K., Hiironen, J., Ärölä, E., & Vitikainen, A. (2015). Profitability of Forest Land Consolidation—a Finnish Case Study. In *FIG Working Week 2015, Sofia, Bulgaria, 1721 May 2015*. FIG-International Federation of Surveyors.
25. La Croix, S. (2015). Land confiscations and land reform in natural-order states. In *Sustainable Economic Development* (pp. 189-200). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800347-3.00011-X>
26. Li, H., Jin, X., McCormick, B. P., Tittonell, P., Liu, J., Han, B., & Zhou, Y. (2023). Analysis of the contribution of land consolidation to sustainable poverty alleviation under various natural conditions. *Land Use Policy*, 133, 106871. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.106871>
27. MacKenzie, S. B., Podsakoff, P. M., & Jarvis, C. B. (2005). The problem of measurement model misspecification in behavioral and organizational research and some recommended solutions. *Journal of applied psychology*, 90(4), 710. <https://doi.org/10.1037/0021-9010.90.4.710>
28. Mazhary, M. E., & Poodat, F. (2019). The Role of Rituals in the Structure of Traditional City (The Case Study: Shushtar City). *Quarterly Journal of Social Development (Previously Human Development)*, 13(4), 178-208.
29. Mehmetoglu, M. (2012). Partial least squares approach to structural equation modeling for tourism research. In *Advances in Hospitality and leisure* (pp. 43-61). Emerald Group Publishing Limited. [https://doi.org/10.1108/S1745-3542\(2012\)0000008007](https://doi.org/10.1108/S1745-3542(2012)0000008007)
30. Popa, B., Niță, M. D., & Hălălișan, A. F. (2019). Intentions to engage in forest law enforcement in Romania: An application of the theory of planned behavior. *Forest Policy and Economics*, 100, 33-43. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2018.11.005>
31. Raziuddin, K., Vaithianathan, S. (2018). A fresh look at understanding green consumer behavior among young urban Indian consumers through the lens of Theory of Planned Behavior. *J. Clean. Prod.* 183, 46–55. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.09>
32. Sánchez, M., López-Mosquera, N., Lera-López, F., & Faulin, J. (2018). An extended planned behavior model to explain the willingness to pay to reduce noise pollution in road transportation. *Journal of cleaner production*, 177, 144-154. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.210>
33. Savari, M., & Khaleghi, B. (2024). Factors influencing the application of forest conservation behavior among rural communities in Iran. *Environmental and Sustainability Indicators*, 21, 100325. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2023.100325>
34. Savari, M., & Khaleghi, B. (2025). Promoting safe and pro-environmental behaviors for sustainable forest management: Integrating technology acceptance model and the norm activation model. *Socio-Economic Planning Sciences*, 98, 102158. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2025.102158>
35. Savari, M., Amghani, M. S., & Malekian, A. (2025a). Factors influencing the use of treated wastewater for irrigation in the agricultural sector: evidence from Iran. *Cleaner Engineering and Technology*, 100901. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.100901>

36. Savari, M., Damaneh, H. E., & Damaneh, H. E. (2024b). Managing the effects of drought through the use of risk reduction strategy in the agricultural sector of Iran. *Climate Risk Management*, 45, 100619. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2024.100619>
37. Savari, M., Damaneh, H. E., & Damaneh, H. E. (2025b). Discover the determining factors of the use of mangrove forests conservation behaviors. *Journal for Nature Conservation*, 83, 126768. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2024.126768>
38. Savari, M., Khaleghi, B., & Sheheytavi, A. (2024c). Iranian farmers' response to the drought crisis: How can the consequences of drought be reduced?. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 114, 104910. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2024.104910>
39. Savari, M., Sheheytavi, A., & Amghani, M. S. (2023). Factors underpinning Iranian farmers' intention to conserve biodiversity at the farm level. *Journal for Nature Conservation*, 73, 126419. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2023.126419>
40. Savari, M., Zhoolideh, M., & Limuie, M. (2024a). The combination of climate information services in the decision-making process of farmers to reduce climate risks: application of social cognition theory. *Climate Services*, 35, 100500. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2024.100500>
41. Shahabinejad, M., Yousefi, A. and Amini, A. (2015). Investigating the factors affecting farmers' willingness to participate in land consolidation projects in Meimeh district of Isfahan province, *Journal of Applied Research in Geographical Sciences*, 15(37), pp. 7-24. (In Persian)
42. Sharifi, M. Sardarshahraki, A. Dadash, M. Asgari, M. (2019). Studying the process of agricultural land consolidation and its economic effects. Case study: Rice farmers in Guilan province. *Journal of Agricultural Economics Research*, 11 (1); 217-236. (In Persian)
43. Shokati Amghani, M., Mojtahedi, M., & Savari, M. (2023). An economic effect assessment of extension services of agricultural extension model sites for the irrigated wheat production in Iran. *Scientific Reports*, 13(1), 16947. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44290-5>
44. Si, H., Shi, J. G., Tang, D., Wen, S., Miao, W., & Duan, K. (2019). Application of the theory of planned behavior in Environmental Science: A comprehensive bibliometric analysis. *International journal of environmental research and public health*, 16(15), 2788. <https://doi.org/10.3390/ijerph16152788>
45. Soorani, F., & Ahmadvand, M. (2019). Determinants of consumers' food management behavior: Applying and extending the theory of planned behavior. *Waste management*, 98, 151-159. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.08.025>
46. Strydom, W. F. (2018). Applying the theory of planned behavior to recycling behavior in South Africa. *Recycling*, 3(3), 43. <https://doi.org/10.3390/recycling3030043>
47. Tajeri Moghadam, M., Pouralimardan, S. and Raheli, H. (2016). Measuring farmers' willingness to participate in the land consolidation plan in the central part of Arzoiyeh County, Kerman Province, *Quarterly Journal of Rural Development Strategies*, 3(2), pp. 255-265. (In Persian).
48. Tong, W., Lo, K., & Zhang, P. (2020). Land consolidation in rural China: Life satisfaction among resettlers and its determinants. *Land*, 9(4), 118. <https://doi.org/10.3390/land9040118>
49. Tran, D., Vu, H. T., & Goto, D. (2022). Agricultural land consolidation, labor allocation and land productivity: A case study of plot exchange policy in Vietnam. *Economic Analysis and Policy*, 73, 455-473. <https://doi.org/10.1016/j.eap.2021.11.017>
50. Ullah, S., Abid, A., Aslam, W., Noor, R. S., Waqas, M. M., and Gang, T. (2021). Predicting behavioral intention of rural inhabitants toward economic incentive for deforestation in Gilgit-Baltistan, Pakistan. *Sustainability*, 13(2), 617. <https://doi.org/10.3390/su13020617>
51. Uyan, M., Janus, J., & Ertunç, E. (2023). Land Use Suitability Model for Grapevine (*Vitis vinifera* L.) Cultivation Using the Best Worst Method: A Case Study from Ankara/Türkiye. *Agriculture*, 13(9), 1722. <https://doi.org/10.3390/agriculture13091722>
52. Wang, W., Lan, Y., & Wang, X. (2021). Impact of livelihood capital endowment on poverty alleviation of households under rural land consolidation. *Land Use Policy*, 109, 105608. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105608>

53. Wetzels, M., Odekerken-Schröder, G., & Van Oppen, C. (2009). Using PLS path modeling for assessing hierarchical construct models: Guidelines and empirical illustration. *MIS quarterly*, 177-195. <https://doi.org/10.2307/20650284>

تأثیر فشردگی خاک بر عملکرد محصول و ارزش اقتصادی زمین

جهانبخش میرزاوند، خسرو شهبازی، عزیز مجیدی و زهرا کاظمی* 

استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج

کشاورزی، شیراز، ایران. j.mirzavand@areeo.ac.ir

دانشیار پژوهشی، موسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

khosrw_shahbazi@yahoo.com

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

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

دکتری فیزیک و حفاظت خاک، دانشگاه تبریز، دانشکده کشاورزی، گروه علوم و مهندسی خاک، ایران.

zkazemi2016@gmail.com

دریافت: خرداد ۱۴۰۳ و پذیرش: اسفند ۱۴۰۳

چکیده

کاهش عملکرد محصول و کارایی مصرف منابع، اثرات نامطلوب مستقیم و غیرمستقیم فشردگی خاک بوده که بر سودآوری سامانه‌های کشاورزی تأثیر می‌گذارد. فشردگی خاک با کاهش تخلخل تهویه‌ای، افزایش جرم مخصوص ظاهری (D_b)، مقاومت مکانیکی خاک و کاهش میزان تخلخل کل، ساختمان خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مقاله مروری حاضر به بررسی مطالعات به انجام رسیده در خصوص ارزیابی اثر سامانه‌های مختلف خاک‌ورزی بر میزان فشردگی خاک و تأثیر آن بر عملکرد و ارزش اقتصادی زمین پرداخته است. پژوهش‌ها نشان می‌دهد بین ۸۰-۷۰ درصد فشردگی خاک طی اولین عبور ماشین‌آلات کشاورزی بر روی زمین زراعی اتفاق می‌افتد و کاهش عملکرد محصول ناشی از فشردگی خاک در منابع مختلف در محدوده ۷۵-۵ درصد گزارش گردیده است. در یک پژوهش، میانگین ضررهای مالی ناشی از افزایش فشردگی خاک در هر هکتار زمین زراعی برای اوکراین و لیتوانی به ترتیب ۴۹ و ۱۳ یورو در هکتار در سال پیش‌بینی گردید. خسارت مالی ناشی از فشردگی خاک در اثر پخش کود مایع با تانکر سنگین با وزن بیش از ۱۸ تن و فشار بیش از ۲۰۰ کیلوپاسکال روی خاک مرطوب در اوایل بهار در کانادا نیز ۳۰ تا ۳۰۰ دلار در هکتار برآورد شد و افزایش فشار چرخ‌های ادوات کشاورزی از یک مگاپاسکال به نه مگاپاسکال در سوئد مقدار درآمد خالص زمین زراعی را ۲۵ درصد کاهش داد. بررسی‌ها بیانگر این است که که بکارگیری کم‌خاک‌ورزی منجر به صرفه‌جویی اقتصادی، افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌گردد و در اغلب موارد افزایش عملکرد محصول در واحد سطح را به دنبال داشته است.

واژه‌های کلیدی: تخلخل تهویه‌ای، جرم مخصوص ظاهری، ساختار خاک، گازهای گلخانه‌ای، مقاومت مکانیکی خاک

* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: zkazemi2016@gmail.com

مقدمه

کاهش عملکرد محصول ناشی از فشردگی خاک یکی از نگرانی‌های عمده عصر حاضر بوده و برای کشاورزی پایدار^۱ نامطلوب است (Tietjens et al., 2024). استفاده از ماشین‌آلات سنگین برای عملیات کاشت، داشت و برداشت محصولات می‌تواند باعث افزایش فشردگی خاک و کاهش عملکرد محصول شود. فشردگی خاک با افزایش جرم مخصوص ظاهری (D_b)^۲، مقاومت مکانیکی خاک (SR)^۳ کاهش تخلخل تهویه‌ای^۴ و کاهش میزان تخلخل کل^۵، ساختار خاک را تغییر می‌دهد و با تغییر آرایش ریشه گیاه منجر به کاهش جذب عناصر غذایی و رشد گیاه و نهایتاً کاهش زیست‌توده^۶ (بیوماس) و عملکرد محصول می‌گردد (Wolkowski & Lowery, 2008; Radojević et al., 2022; Frene et al., 2024). بر مبنای پیش‌بینی سازمان ملل متحد انتظار می‌رود تا سال ۲۰۵۰ جمعیت جهان به ۹/۶ میلیارد نفر برسد (Bhatta et al., 2024) و بررسی‌ها نشان می‌دهد در حدود ۶۰٪ از خاک‌های اروپا با مشکل فشردگی مواجه هستند (Tietjens et al., 2024). بنابراین حفظ سلامت خاک برای تأمین امنیت غذایی جهان ضروری است (Bhatta et al., 2024). به‌منظور حفظ سلامت خاک استفاده از ماشین‌آلات مناسب برای عملیات زراعی، زدن زیرشکن و عملیات خاک‌ورزی عمیق مؤثر بوده و میزان فشردگی خاک را کاهش خواهد داد. محققین بر این باورند که لاستیک‌های با خمش بالا که با فشار باد کمتر کار می‌کنند، سطح تماس تایر با خاک را افزایش داده و هنگامی که با سامانه‌های خاک‌ورزی مناسب همراه شوند، می‌توانند منجر به تراکم کمتری گردند (Shaheb et 2021; Kik et al., 2024). از طرف دیگر تناوب زراعی با گیاهان ریشه‌دار و پوششی (مانند ایجاد حفاری زیستی با تجزیه ریشه‌ها) و روش‌های کشاورزی حفاظتی می‌تواند نقش مهمی در کاهش تراکم خاک داشته باشد که منجر به افزایش حجم

منافذ برای حمایت از توسعه و دسترسی مناسب ریشه به مواد مغذی شود (Piccoli et al., ; Kik et al., 2024). مقاله حاضر به درک بهتر علل و اثرات فشردگی خاک ناشی از به‌کارگیری استفاده از ماشین‌آلات سنگین بر رشد و توسعه محصول، عملکرد و بازده اقتصادی زمین کمک می‌کند و اطلاعات مفیدی را در اختیار کشاورزان، محققان و سیاست‌گذاران قرار می‌دهد تا تصمیمات بهتری در راستای کاهش تأثیر فشردگی خاک در کشاورزی و تولید اتخاذ نمایند.

تأثیر افزایش مقاومت مکانیکی خاک در کاهش عملکرد

محصولات مختلف

بین ۷۰ تا ۸۰ درصد فشردگی خاک در طی اولین عبور ماشین‌آلات از زمین رخ می‌دهد (Wolkowski & Lowery, 2008). گلینسکی و لپیک (Gliński & Lipiec, 1990) مقادیر مقاومت مکانیکی (SR)، به‌عنوان شاخص فشردگی، بحرانی^۷ (SR_c) که در مقادیر بیشتر از آن رشد ریشه شدت کاهش می‌یابد و یا متوقف می‌شود را برای محصولات مختلف، بین ۰/۹ تا ۸ مگاپاسکال (MPa) تعیین کردند (جدول ۱). بیشترین مقدار SR_c (۸ مگاپاسکال) به گیاه چاودار چندساله و کمترین آن (۱/۶-۰/۹ مگاپاسکال) به گیاه ذرت تعلق داشت که به ترتیب در خاک لوم و لوم‌شنی کشت شده بودند. رشد ریشه گیاه چاودار در SR_c ۸۰ درصد و رشد گیاه ذرت ۵۰ درصد کاهش یافت (جدول ۱). اطلاعات قابل توجهی وجود دارد که روابط منفی بین جرم مخصوص ظاهری (D_b) (به‌عنوان شاخص فشردگی) و عملکرد محصول را نشان می‌دهند (Kayombo & Lal, 1994). به‌عنوان مثال استیرزاکر و همکاران (Stirzaker et al., 1996) در آزمایش‌های گلدانی نشان دادند که وزن خشک اندام هوایی جو (*Hordeum vulgare*) در D_b معادل ۱/۷۸ مگاکرم بر مترمکعب ۲۶ درصد کمتر از مقدار آن در D_b معادل ۱/۶۴

5-Total porosity

6 -Biomass

7 -Critical mechanical resistance

1 -Sustainable agriculture

2 -Bulk density

3 -Soil mechanical resistance

4 -Aeration porosity

مگاگرم بر مترمکعب است. عملکرد اندام هوایی و طول ریشه نخودفرنگی (*Pisum sativum*) نیز در جرم مخصوص ظاهری ۱/۷ مگاگرم بر مترمکعب در مقایسه با مقادیر آن‌ها در D_b مطلوب ۱/۴۷ مگاگرم بر مترمکعب به ترتیب ۷۵ و ۵۷ درصد به دست آمد (Stirzaker et al., 1996). کانل (Cannell, 1977) پیشنهاد کرد که افزایش D_b از ۱/۳ تا ۱/۷ مگاگرم بر مترمکعب ممکن است رشد ریشه و عملکرد گیاه چچم را محدود کند. این محققین چچم (*Lolium perenne*) را در گلدان‌های حاوی خاکسترهای آتشفشانی در لایه‌هایی با D_b متفاوت پرورش دادند. با افزایش D_b از ۰/۹ به ۱/۲ مگاگرم بر مترمکعب، در زیر عمق جوانه‌زنی، عملکرد علوفه طی ۱۷۱ روز به مقدار ۵۰ درصد کاهش یافت. هولبروک و همکاران (hoolbrook et al., 1977) گزارش کردند که اثرات نامطلوب بر رشد و عملکرد ریشه چچم در جرم مخصوص ظاهری کمتر یا مساوی ۱/۳ مگاگرم بر مترمکعب، نسبت به

آنچه معمولاً در منابع گزارش شده است، رخ می‌دهد. با این حال، تخلخل تهویه‌ای^۸ (AFP) در تیمارهای مختلف D_b در گلدان‌های حاوی خاکسترهای آتشفشانی، ۳۸-۱۷٪ بود، بنابراین AFP به خودی خود ممکن است محدودکننده رشد چچم نباشد (hoolbrook et al., 1977). دروری و همکاران (Drewry et al., 2004) در طی یک پژوهش هفت‌ساله در خصوص تأثیر چرای دام‌ها بر عملکرد علوفه مراتع مشاهده کردند در تمام سایت‌های مورد مطالعه، در عمق ۵۰-۰ میلی‌متر، یک درصد افزایش در تخلخل درشت^۹ (ماکروپوروزیتی) با افزایش ۱/۶ درصدی و در عمق ۱۰۰-۵۰ میلی‌متر، افزایش یک واحد در ماکروپورها با افزایش ۲/۶ درصدی عملکرد نسبی علوفه بهاره همراه بود (Drewry et al., 2004). در یک بررسی انجام‌شده توسط هو و همکاران (Hu et al., 2021) نیز مقدار کاهش عملکرد مرتع به ازای هر یک درصد کاهش ماکروپورها ناشی از فشردگی توسط چارپایان، ۲/۵ درصد گزارش شد.

جدول ۱- تأثیر مقاومت مکانیکی خاک بر رشد ریشه

Table 1- Effect of soil mechanical resistance on root growth (Gliński & Lipiec, 1990)

بافت خاک	مقاومت مکانیکی بحرانی (مگا پاسکال)	درصد کاهش رشد ریشه	گیاه
لوم شنی	0.9-1.6	50%	ذرت
لوم رس شنی	1.3-1.7	50%	جو
لوم	2.5	توقف	پنبه
رسی	3	توقف	نخود
سیلتی	4.6-5.1	توقف	جو دوسر
لوم	5	50%	ذرت
متنوع	2-3.5	محدود	چاودار ایتالیایی
لوم	8	80%	چاودار چند ساله

۱/۶ مگاگرم بر مترمکعب و وضعیت رطوبتی مشابه، با کاهش D_b از ۱/۴ به ۱/۳ مگاگرم بر مترمکعب، مقدار محصول ۸/۵ درصد افزایش یافت. در حالتی که فشردگی به دلیل تردد ماشین‌آلات اتفاق افتاد. با یک دهم واحد افزایش در D_b از ۱/۴ به ۱/۵ مگاگرم بر مترمکعب، ۲۰ درصد و از ۱/۴ به ۱/۶ مگاگرم بر مترمکعب، ۱۷/۳ درصد

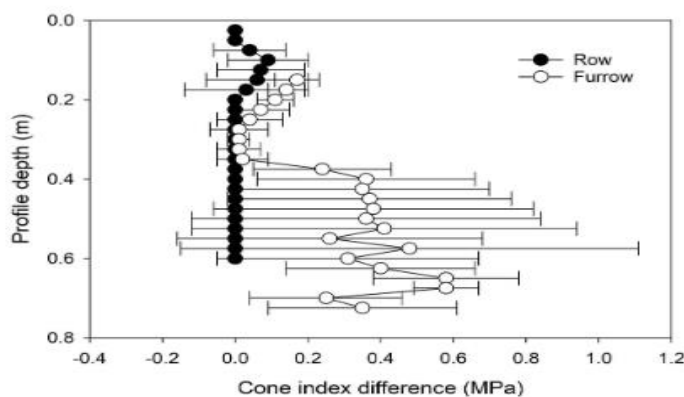
وولکوکسی و لاوری (Wolkowski & Lowery, 2008) عملکرد پنبه را در شرایط مختلف فشردگی خاک سطحی و تحت‌الارض (سخت‌لایه^{۱۰}) و رطوبت در شرایط با و بدون تردد ماشین‌آلات در مزرعه مقایسه کردند. یافته‌های این محققین نشان داد در محصول پنبه در شرایط بدون فشردگی با وجود سخت لایه با D_b

11-acre
12 -bushel
13 -Centum weight or hundred weight
14 -Non compacted
15--compacted
16 -Penetration resistance

باعث بهبود رشد محصول و عملکرد شد. به عنوان مثال، عملکرد دانه پس از دو سال متوالی تراکم (۵/۲۱ تن در هکتار) به طور قابل توجهی کمتر از عملکرد پس از یک سال تراکم (۷/۵۹ تن در هکتار) بود که در سال بعدی هیچ فشردگی اعمال نشده بود. کاهش عملکرد ناشی از تراکم در خاک‌هایی با محتوای رس بالاتر بیشتر بود که به شرایط فیزیکی نامطلوب خاک ناشی از تراکم و مشکلات حاصلخیزی ناشی از کمبود N (ازت) نسبت داده شد (Gregorich et al., 2011). گادوین و همکاران (Godwin et al., 2019) گزارش کردند اثر فشردگی خاک، بسته به شدت و مقدار آن، می‌تواند عملکرد محصول را به میزان ۱۰ تا ۱۵ درصد کاهش دهد (Godwin et al., 2019). در یک پژوهش مشخص شد که عملیات خاک-ورزی با یک وسیله نقلیه به وزن ۱۱ مگاگرم (تن) موجب تراکم خاک و کاهش عملکرد دانه ذرت به میزان ۱۵ تا ۴۳ درصد شد (Voorhees, 2000). در یک پژوهش دیگر تراکم ناشی از خاک‌ورزی با ماشین‌آلات به وزن هشت مگاگرم عملکرد را ۱۷ درصد کاهش داد (Gregorich et al., 2011). پاسخ محصول به فشردگی خاک ممکن است در شرایط خاک خشک و مرطوب متفاوت باشد. نتایج یک مطالعه بلندمدت ۱۷ ساله نشان داد که کاهش عملکرد در اثر تراکم خاک در خاک رسی در فصول مرطوب بیشتر از فصول خشک بود (Alakukku, 2000). با این حال، عبور ماشین‌آلات متعدد در یک خاک سیلتی لوم باعث کاهش تقریباً ۳۳ درصدی محصول در سال‌های خشک در مقایسه با یکبار عبور ماشین‌آلات در سال‌هایی شد (پنج درصد) که کمبود رطوبت خاک وجود نداشت (Galambosová et al., 2017). این تناقض بین یافته‌های دو مطالعه اخیر، احتمالاً به بافت خاک، فشردگی اولیه خاک و تعداد تردد ماشین‌آلات مربوط باشد. خاک رسی در مقایسه با سیلت

لوم دارای منافذ ریز (میکروپور) بیشتر و در شرایط مرطوب مستعد فشردگی و در نتیجه کاهش عملکرد بیشتری است ولی با افزایش میزان تردد حتی در شرایط خشک نیز این احتمال وجود دارد. بوتا و همکاران (Botta et al., 2010) نیز دریافتند فشردگی خاک (ناشی از تردد تجهیزات سنگین)، باعث کاهش شدید عملکرد دانه سویا (۳۸-٪/۹/۸) برای سه فصل رشد متوالی شد و خاک‌هایی که در اثر فشار باد کم تأثیر ماشین‌آلات کمتر فشرده شده بودند، رشد و عملکرد محصول بالاتری داشتند (Shaheb et al., 2021). در نتیجه، در مقایسه با خاک‌هایی که در آن تراکم خاک ناشی از فشار زیاد باد تأثیر است، بازده اقتصادی بهتری داشتند (Smith et al., 2014; Shaheb et al., 2021; Stranks, 2006). در یک بررسی انجام گرفته توسط جمالی و همکاران (Jamali et al., 2021) میانگین عملکرد پنبه در تیمار شاهد به طرز قابل توجهی (۲۷٪) بالاتر از تیمارهای تحت فشردگی بود که در آن‌ها تردد توسط یک تراکتور با وزن ۱۹/۲ تن در دو طرف ردیف بوته انجام گرفته بود. تراکم در مقایسه با تیمار شاهد منجر به کاهش معنی‌دار ۱۹، ۵۶ و ۲۱ درصد به ترتیب در ماده خشک رویشی، ماده خشک زایشی و سطح برگ شد. مقاومت خاک اندازه‌گیری شده قبل از تردد، با عمق افزایش یافت و بین ۰/۵ تا ۳ مگاپاسکال بود. مقاومت خاک در ردیف‌ها تغییری نکرد، اما مقاومت ۲۰ سانتی‌متری فوقانی خاک در شیارها (یعنی زیر چرخ‌ها) به مقدار ۰/۱ تا ۰/۲ مگاپاسکال افزایش یافت که بالاترین افزایش مقاومت خاک تا مقدار متوسط ۰/۶ مگاپاسکال در عمق ۴۰ الی ۷۰ سانتی‌متری خاک مشاهده گردید. (شکل ۱).

جدول ۳ میزان کاهش عملکرد چغندر قند را در یک خاک با محتوای رس ۴۱ درصد (خاک چرنوزوم) بسته به عمق خاک متراکم شده نشان می‌دهد.



شکل ۱- تفاوت در مقاومت مکانیکی خاک پروفیل قبل و بعد از تردد ماشین‌آلات در ردیف‌ها و شیارها

Figure 1- Difference in soil mechanical resistance of profile measured before and after traffic in rows and furrow (Jamali et al., 2021)

جدول ۳- عملکرد چغندر قند و نسبت ریشه‌های بدشکل در یک خاک چرنوزوم با محتوای رس ۴۱ درصد به فشردگی در اعماق مختلف
Table 3- Yield response and proportion of deformed roots of sugar beet in chernozem soil with 41% clay content to soil compaction in different depths (Lipiek et al., 2003)

موقعیت لایه فشرده (cm)	کاهش عملکرد (%)	ریشه‌های بدشکل (%)
غیر فشرده	$32.54 \text{Mg ha}^{-1} = 100\%$	2.1
<28	10-13	5.6
<22	21-25	13.4
6-10 و زیر 28	29-32	18.8
0-30 (فشرده شده بعد از کاشت)	55-59	53.2
LSD _{0.05}	16.3	2.0

۴۳/۵ درصد بیشتر از عملکرد در D_b معادل ۱/۳۵ مگاگرم بر مترمکعب بود، به این معنی که افزایش ۰/۲ واحد فشردگی، از ۱/۱۵ به ۱/۳۵ مگاگرم بر مترمکعب، مقدار محصول را ۴۳/۵ درصد افزایش داده است. در گیاه ارزن نیز با افزایش D_b از ۱/۰۶ به ۱/۳۴ مگاگرم بر مترمکعب عملکرد دانه افزایش یافت و بیشترین مقدار آن (حدود ۱۳ درصد) در D_b مساوی ۱/۲۴ مگاگرم بر مترمکعب اتفاق افتاد. افزایش بیشتر D_b تا ۱/۵۱ مگاگرم بر مترمکعب، مقدار محصول را ۱۱/۲ درصد کاهش داد (Lipiek et al., 2003).

نتایج نشان می‌دهد بیشترین میزان فشردگی (۵۹-۵۵٪) موقعی اتفاق می‌افتد که فشردگی پس از کاشت در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر اتفاق می‌افتد (جدول ۳) (Lipiek et al., 2003).

در جدول ۴ نیز کاهش مقدار عملکرد (دانه و ریشه) در دو گیاه جو و ارزن در جرم مخصوص‌های ظاهری مختلف نشان داده شده است (Lipiek et al., 2003). نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد مقدار عملکرد دانه جو در بین سه D_b معادل ۰/۹۵، ۱/۱۵ و ۱/۳۵ مگاگرم بر مترمکعب، در D_b معادل ۱/۱۵ (۲/۰۵ تن بر هکتار) بیشترین بود که ۵/۴ درصد بیشتر از عملکرد در D_b معادل ۰/۹۵ و

جدول ۴- عملکرد (دانه و ریشه) جو و ارزن در خاک‌های فشرده

Table 4- Yield (grain and root size) of barley and millet in compacted soils (Lipiek et al., 2003)

دانه:ریشه	ریشه	دانه	D _b
	Mg h ⁻¹	Mg h ⁻¹	Mg m ⁻³
	جو- خاک چرنوزم تیبیک لوم سنگین ^{۱۹}		
0.84	2.31	1.94	0.95
1.14	1.79	2.05	1.15
0.99	1.17	1.16	1.35
	ارزن- خاک لوم سبک پدزولی جنگلی خاکستری ^{۲۰}		
1.53	2.31	3.54	1.06
2.05	1.98	4.06	1.24
2.24	1.73	3.88	1.34
2.42	1.29	3.20	1.51

رومانیایی، هیچ رابطه‌ای بین عملکرد محصول و شاخص-های فشردگی خاک وجود نداشت (داده‌ها نشان داده نشده است). در این سایت، به ازاء یک درصد افزایش فشردگی یا هر واحد کاهش AFP، دو درصد کاهش عملکرد مشاهده گردید. این یافته نشان داد افزایش درجه فشردگی^{۲۲} از ۸۳٪ (میانگین خاک‌های رومانی) به ۸۷٪ (محدودیت فشردگی برای رشد محصول)، به کاهش هفت درصدی در عملکرد محصول منجر خواهد شد (Piccoli et al., 2022). طبق تعریف هاکانسون (Håkansson, 1990) درجه فشردگی، نسبت جرم مخصوص ظاهری یک خاک در حالت خشک به وزن مخصوص ظاهری همان خاک در حالت متراکم است.

ویتسل و هابز (Wittsell & Hobbs, 1965) نشان دادند که افزایش چگالی ظاهری یک خاک لوم سیلت در کانزاس از ۱/۲۲ به ۱/۷ مگاگرم بر مترمکعب، مرحله رسیدن محصول را به مدت دو هفته را به تأخیر انداخت و عملکرد را تا ۵۸ درصد کاهش داد. فلاکر و نیلسن (Flocker & Nielsen, 1962) گزارش کردند که افزایش D_b به‌تنهایی بر عملکرد گوجه‌فرنگی تأثیری ندارد و سطح D_b تنها در مکش‌های زیاد خاک بر رشد و عملکرد گیاه تأثیر می‌گذارد. لپور و همکاران (Lepore et al., 2024) نیز نتیجه گرفتند عبور و مرور ماشین‌آلات کشاورزی در

تراکم خاک یک تهدید بزرگ برای کشاورزی در اروپا است، پیکولی و همکاران (Piccoli et al., 2022) در یک تحقیق، در چند سایت که در امتداد شیب‌های شمال جنوب و شرق-اروپا واقع شده‌اند، پنج مطالعه موردی کوتاه مدت (کمتر از پنج سال) انجام دادند. این پژوهش‌گران سامانه‌های کشت بهبوددهنده خاک (SICSS^{۲۱}) زیر را برای کاهش فشردگی خاک سطحی و زیرسطحی بکار بردند. در دو سایت سوئد و رومانی با استفاده از تیمارهای خاک‌ورزی با زیرشکن، تراکم زیرسطحی طبیعی مورد مطالعه قرار گرفت. عمق مورد مطالعه در سوئد و رومانی به ترتیب ۳۵ و ۶۰ سانتی‌متری خاک بود. پیکولی و همکاران (Piccoli et al., 2022) در سایر سایت‌ها (نروژ، بریتانیا و ایتالیا) با بکارگیری گیاهان با ریشه عمیق (با خاصیت حفاری زیستی نظیر یونجه) و انواع مختلف خاک‌ورزی یا ترکیبی از هر دو، به فشردگی خاک سطحی و زیرسطحی متمرکز شدند (بیشتر از ۲۵ سانتی‌متر در نروژ و بریتانیا و بیشتر ۳۰ سانتی-متر در ایتالیا). در هر سایت اثربخشی SICSS با اندازه‌گیری خواص فیزیکی خاک ارزیابی و شاخص‌های فشردگی خاک محاسبه شد. نتایج نشان داد برای مثال، یونجه در نروژ پتانسیل خوبی برای کاهش فشردگی دارد (تراکم زیر خاک از ۱/۶۹ به ۱/۴۵ مگاگرم بر مترمکعب کاهش یافت) و در سایت سوئد زیرشکن‌زنی نفوذ ریشه به زیر خاک را تا حدود ۱۰ سانتی‌متر بهبود بخشید، اما اثرات SICSS بر عملکرد محصول به‌طورکلی کم بود. به‌استثنای سایت

¹⁹ -Chernozem typical heavy loamy²⁰ -Grey forest podzolized light loam²¹ -Soil improving crop systems²² -Degree of compaction

SMD^{۲۳} مساوی ۱۰ میلی متر باعث افزایش D_b نگردید و در SMD کوچک تر و مساوی صفر (حدود FC) خاک مستعد تخریب فیزیکی بود. طبق بررسی هو و همکاران (Hu et al., 2021) بسته به اقلیم، بافت خاک و گونه، مقدار بهینه برای شرایط فیزیکی خاک متفاوت است و درحالی که تراکم تمایل به کاهش عملکرد بیشتر در سال های با بارندگی متوسط یا بالاتر از متوسط دارد، ممکن است در فصول خشک نیز عملکرد را افزایش دهد. برونوت و همکاران (Brunotte et al., 2021) نیز گزارش کردند بکارگیری ماشین آلات کشاورزی در علفزارها در تابستان- های خشک خطر تراکم خاک را به طرز قابل توجهی کاهش داد. هبلسویت و مک گوان (Hebblethwaite, & McGowan, 1980) نشان دادند هنگامی که فشردگی خاک در حالت خشک اتفاق افتاد D_b خاک لوم شنی سبک از ۱/۴ به ۱/۶۶ مگاگرم بر مترمکعب افزایش یافت، در حالیکه فشردگی در حالت مرطوب، D_b خاک را به ۱/۷ مگاگرم بر مترمکعب افزایش داد. تراکم خشک عملکرد محصول را ۱۷٪ تا ۳۹٪ و فشردگی در حالت مرطوب ۵۱٪ تا ۵۵٪ کاهش داد. اسمیتل و ویلیامسون (Smittle & Williamson, 1977) نشان دادند که فشردگی باعث کاهش ۲۵ تا ۳۵ درصدی عملکرد خیار شد. رشد ریشه خیار با SR خاک بیشتر از ۵۰۰ کیلو پاسکال کاهش یافت و در SR معادل ۸۵۰ کیلو پاسکال این کاهش به ۸۰ درصد رسید. کر و دودز (Carr, & Dodds, 1983) مشاهده کردند کاهش رشد ریشه کاهو تحت تأثیر افزایش جزئی در D_b است و افزایش جرم مخصوص ظاهری از ۱/۲۵ به ۱/۵ مگاگرم بر مترمکعب در یک خاک لوم شنی بدون ساختمان^{۲۴}، وزن تر و خشک گیاه را تا ۲۵ درصد کاهش داد.

ایلر و استونسون (Iler & Stevenson, 1991)

با بررسی منابع و تحقیقات انجام شده در خصوص میزان تأثیر فشردگی خاک بر عملکرد برخی محصولات زراعی و سبزی ها، نتایج را به شرح جدول ۵ ارائه دادند. طبق بررسی

نامبردگان، ریدر (Reeder, 1990) پس از بررسی تأثیر فشردگی بر عملکرد گوجه فرنگی، ذرت شیرین و کلم با استفاده از ۱۰ و ۱۷ تن در هر محور، نشان داد که سال اول ایجاد تراکم، کلم در مراحل اولیه رشد ۸۵ درصد و گوجه- فرنگی برای وسایل نقلیه به وزن ۹ و ۱۵/۵ بار به ترتیب ۱۰ و ۵ درصد کاهش عملکرد نشان داد (جدول ۵). میزان کاهش و افزایش احتمالی محصول ذرت توسط محققین مختلف (جدول ۵) در سال ها و با وسایل نقلیه به وزن های مختلف مورد بررسی قرار گرفت و بیشترین مقدار کاهش عملکرد (۵۰٪) در سال اول و تحت تراکم با وسیله نقلیه به وزن ۲۰ تن اتفاق افتاد که توسط راغاون و همکاران (Raghavan et al., 1978) گزارش شد. گندم در سال سوم پس از ایجاد تراکم با وسایل نقلیه به وزن ۹ و ۱۸ تن تا ۵۵ درصد کاهش عملکرد نشان داد (جدول ۵) (Voorhees, 1985).

طبق گزارش تروس (Trowse, 1979) در خاک

لوم رسی در مقادیر D_b معادل ۱/۲۵، ۱/۳۵، و ۱/۴۱ مگاگرم بر مترمکعب نرخ رشد روزانه ریشه به ترتیب ۵۷، ۶۷ و ۷۲ درصد کاهش یافت. لیندمن و همکاران (Lindemann et al., 1982) اثر فشردگی بر عملکرد دانه سویا را با فشرده کردن یک خاک لوم رسی با حداکثر سه بار عبور تراکتور ۳۵۸۳ کیلوگرمی ارزیابی و مشاهده کردند در سال های خشک، عملکرد تا ۱۵ درصد بهبود یافت و در سال های مرطوب تا شش درصد کاهش یافت. باین حال، اثر تراکم بر عملکرد دانه سویا از نظر آماری معنی دار نبود و به نظر می رسد وابسته به میزان بارندگی در فصل رشد باشد. کاتوچ و همکاران (Katoch et al., 1983) در مطالعه دیگری با استفاده از سویا نشان دادند که افزایش D_b یک خاک لوم رسی سیلتی از ۱/۱۴ به ۱/۵۳ مگاگرم بر مترمکعب، به طور قابل توجهی باعث کاهش عملکرد و محتوای پروتئین می- شود. عملکرد دانه و محتوای پروتئین به ترتیب ۷۷ و ۸۸ درصد عملکرد سویای کشت شده در خاک غیرمترکم بود.

جدول ۵- اثر تراکم خاک بر عملکرد برخی محصولات زراعی و سبزی‌ها

Table 5-Effect of soil compaction on yield of some agricultural crops and vegetables (Iler & Stevenson, 1991)

منبع	درصد کاهش (-) یا افزایش محصول (+)	سال	فشار (کیلوپاسکال)	وزن وسیله نقلیه (تن)	محصول
Reeder (1990)	-10 -5	1 1		9 15.5	گوجه‌فرنگی
Reeder (1990)	-35 -48	1 1		9 15.5	ذرت شیرین
Voorhees (1977)	-35			2	سیب‌زمینی
(Smittle & Williamson 1977,1978)	50 -25-35	1 1		2.1 2.3	خیار
Reeder (1990)	-85 -45	1 1		9 15.5	کلم (مراحل اولیه رشد)
Reeder (1990)	-49 -27	1 1		9 15.5	کلم (مراحل آخر رشد)
Smittle & Williamson (1978)	-46-58	1		2.3	کدو
Croissant et al (1988)	-18 -40	1	1216	3.4 2.7	لوبیا چیتی
Bicki & Siemens (1990)	+8 تا -8	3	150	8.1	ذرت
Mielke & Jones (1990)	-15	3	240		
Reeder (1990)	-5	1		18	
Voorhees (1987)	-10	1		9	
Voorhees (1987)	-27	1		18	
Soane et al. (1986)	-7.5	1		5.4	
Raghavan et al. (1978)	-50	1		20	
Reeder (1990) Bicki & Siemens (1990)	-8 تا +8	3	150	8.1	سویا
Voorhees (1985)	-28 تا -6	2 11		18 18 و 9	
	+5 تا -55				
Voorhees (1985)	+5 تا -55	3		18 و 9	گندم
Soane et al. (1986)	+5 تا -30	3		4.2	
Butorac (1982)	+17 تا -38				جو دوسر
Butorac (1982)	+22 تا -10				چاودار

افزایش فشردگی، کاهش عملکرد و برآورد ارزش اقتصادی آن

اگرچه تعیین کمی هزینه اقتصادی فشردگی خاک دشوار است ولی توسط چندین منبع برآورد شده است (Ruis et al., 2023; Parvin et al., 2022; Zabrodskyi et al. 2021; Hakanson, 2005; Iler & Stevenson, 1991). فشردگی خاک تحت‌الارض علاوه بر تأثیر مستقیم بر عملکرد، می‌تواند به‌طور غیرمستقیم نیز عملکرد را کاهش دهد. برای مثال کاهش مقدار زهکشی داخلی خاک در اثر تراکم خاک، باعث خواهد شد زمان ماندابی شدن خاک طولانی شود و عملیات مزرعه‌ای که باعث افزایش عملکرد می‌شوند، به تأخیر بیافتد و کاشت پس از تاریخ کاشت بهینه می‌تواند منجر به کاهش عملکرد شود. وورهیس (Voorhees, 1983) در یک مطالعه بر روی یک خاک لومی‌رسی مشاهده کردند افزایش فشردگی خاک ناشی از پنج بار عبور تراکتور هفت مگاگرمی، باعث شد میزان رطوبت مورد نیاز برای شخم زدن ۴۳ درصد افزایش یابد. کیفیت محصول نیز با فشردگی خاک کاهش می‌یابد و هر گونه کاهش کیفیت، قیمت یک واحد کالا را کاهش می‌دهد. فشردگی می‌تواند با افزایش هزینه نهاده‌های تولید کننده، زیان اقتصادی را تحت تأثیر قرار دهد. هنگامی که فشردگی نفوذ آب را مختل می‌کند و ظرفیت نگهداری آب در خاک را کاهش می‌دهد، میزان رواناب سطحی و فرسایش را افزایش می‌دهد. علاوه بر نگرانی‌های زیست‌محیطی بالقوه در مورد تأثیر روی آبراهه‌ها، عناصر غذایی و بهره‌وری خاک^{۲۵} از بین می‌رود. در شرایط اسکاندیناوی، نتایج آزمایش‌ها نشان داد که هزینه‌های آسیب خاک ناشی از ماشین‌های سنگین اغلب به‌اندازه هزینه ماشین‌آلات و نیروی کار است (Hakansson et al., 1988). ایلر و استونسون (Iler & Stevenson, 1991) خسارات مالی ناشی از پخش کود مایع با تانکر سنگین با

وزن بیش از ۱۸ تن و فشار بیش از ۲۰۰ کیلوپاسکال روی خاک مرطوب در اوایل بهار را ۳۰ تا ۳۰۰ دلار در هکتار محاسبه کردند. این رقم بسته به خاک، محصول و ماشین-آلات متفاوت است، اما در بدترین شرایط، این هزینه بیشتر از ارزش مواد مغذی موجود در کود است (Iler & Stevenson, 1991). تراکم خاک همچنین ارتباط نزدیکی با تلفات محصول و انتشار گازهای گلخانه‌ای، به دلیل استفاده اضافی از سوخت دارد. بنابراین نه تنها نظارت صحیح بر وضعیت خاک و احیای خاک آسیب‌دیده بلکه درک هزینه‌های بهره‌برداری بیش از حد از خاک و خطرات فردی در کشورها و قاره‌های مختلف نیز مهم است. زابردسکی و همکاران (Zabrodskyi et al., 2021) بر اساس داده‌های موجود، هزینه‌های برآورد شده آسیب ناشی از تراکم در کشورهای اوکراین (UA) و لیتوانیایی (LT) را مقایسه کردند. زیرا این کشورها وضعیت مشابهی دارند اما سطوح متفاوتی از مدیریت منابع خاک دارند. ویژگی‌های خاک، مانند انواع خاک و استعداد فشردگی، بسته به نوع آن، در هر دو کشور ارزیابی شد. پارامترهای اصلی مورد استفاده برای برآورد خسارت ناشی از فشردگی عبارت‌اند از: کاهش عملکرد، مصرف سوخت اضافی، تلفات کودهای N، P، K، آلودگی آب، سیل، فرسایش و انتشار گازهای گلخانه‌ای. تلفات بالقوه محصول یکی از پرهزینه‌ترین پیامدهای فشردگی خاک است که معادل هزینه سالانه حدود یک میلیارد یورو برای اوکراین و حدود ۱۰/۷ میلیون یورو برای لیتوانی برآورد شده است (Zabrodskyi et al., 2021). علاوه بر این، استفاده اضافی از سوخت و انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتبط احتمالاً می‌تواند معادل هزینه سالانه ۱۸۰ میلیون یورو برای اوکراین (UA) و حدود چهار میلیون یورو برای لیتوانی (LT) باشد (Zabrodskyi et al., 2021) (جدول ۶).

جدول ۶- میزان هزینه‌های سالانه‌های بالقوه فشردگی در اوکراین و لیتوانی (۲۶ میلیون یورو در سال)

Table 6- Potential annual costs of soil compaction in Ukraine and Lithuania (M EUR Y⁻¹) (Zabrotsky et al., 2021)

کشور	اوکراین	لیتوانی
هزینه‌های مستقیم		
هزینه‌های اضافی ناشی از مصرف سوخت	121.07	1.47
هزینه کاهش عملکرد	95.66-1086.37	10.7
هزینه تلفات کودهای نیتروژنه	157.22	1.51
هزینه تلفات کودهای فسفره	4.61	0.044
هزینه تلفات کودهای پتاسه	6.311	0.0677
هزینه‌های مستقیم کل	1315.23	13.79
هزینه‌های غیرمستقیم		
آلودگی آب‌ها	134.93	گزارش نشده
خدمات کنترل سیلاب‌ها (هزینه ذخیره دوباره)	گزارش نشده	0
هزینه ناشی از فرسایش	59.684	9.18
هزینه‌های ناشی از GHG ^{۲۷} در اثر مصرف سوخت	41.94-45.3	2.69
هزینه‌های اضافی		
هزینه‌های ناشی از انتشار GHG در اثر:		
تلفات نیتروژن	60.19	3.87
تلفات فسفر	0.32	0.02
تلفات پتاسیم	0.21	0.02
هزینه‌های غیرمستقیم کل	297.27-300.63	153.78
هزینه‌های بالقوه کل سالانه	1615.86	29.57
هزینه به ازای هر هکتار زمین زراعی	49.13	12.71
هزینه به ازای هر هکتار زمین متراکم شده	70.1	12.1

درصد و از ۳/۷ تا ۸/۶ درصد برای خاک حاوی ۴۰ درصد رس برای غلات بهاره و از ۲/۵ الی ۵/۱ برای خاک حاوی ۱۰ درصد رس و از ۹/۹ تا ۲۰/۳ درصد برای خاک حاوی ۴۰ درصد رس برای چغندر قند متغیر بود. برای هر دو محصول با افزایش درصد رس مقدار کاهش عملکرد افزایش یافت (جدول ۷) (Hakanson, 2005).

جدول ۷ عملکرد تخمینی سالانه (مگاگرم در هکتار) و کاهش عملکرد کل در محصولات کشت شده در سال بعدی (درصد عملکرد یک سال) ناشی از اثرات باقیمانده فشردگی لایه شخم را نشان می‌دهد (Hakanson, 2005). مقدار کاهش عملکرد بسته به مقدار رس و مرحله بکارگیری ماشین‌آلات و مقدار وزن حاصل از چرخ‌های آنها از ۰/۹ الی ۲/۲ درصد برای خاک با محتوای رس ۱۰

26 -M EUR Y⁻¹

27 -Greenhouse gases

جدول ۷- عملکرد تخمینی سالانه (مگاگرم در هکتار) و کاهش عملکرد کل در محصولات بعدی (درصد عملکرد یک سال) ناشی از اثرات باقی مانده فشردگی لایه شخم

Table 7- Estimated annual number of $Mg \cdot ha^{-1}$ and total yield loss in subsequent crops (% of one year's yield) caused by residual effects of compaction of the plough layer (Hakanson, 2005)

چغندر قند								غلات بهاره	
Mg ha ⁻¹				Mg ha ⁻¹					
کاهش عملکرد (%)				کاهش عملکرد (%)					
40% رس		10% رس		40% رس		10% رس		عملیات	
B ^a		A ^a		B ^a		A ^a			
1.5	0.4	14-32	35	0.1	0.3	11-25	27	۲-۳ بار خرد کردن کلوخ	
0.5	0.1	5-11	12	0.5	0.1	5-11	12	کاشت	
0.3	0.1	3-7	7	0.3	0.1	3-7	7	کوددهی	
0.9	0.2	7-23	25	0.2	0.1	1-4	4	سمپاشی	
0.6	0.2	5-14	16	-	-	-	-	مبارزه مکانیکی با علف‌های هرز	
9.9	2.5	105-210	175	1.5	0.4	9-42	35	برداشت	
-	-	-	-	0.7	0.2	9-14	18	کشت روی کلش	
1.9	0.5	18-44	37	1.9	0.5	18-44	37	خیش زنی	
9.9-20.3	2.5-5.1	160-330	307	3.7-6.6	0.2-2.2	60-140	140	کل	

a: مقادیر عملکرد در ستون A ($Mg \cdot km$) برای ماشینهای معمولی قبل از تنظیم و B) پس از تنظیم رطوبت خاک و فشار زمین ارائه شده است. کمترین مقادیر در B زمانی به دست می آید که لاستیکهای کم فشار در خشکترین شرایطی که معمولاً در حین کار اتفاق می افتد استفاده می شوند و بالاترین مقادیر زمانی که تایرهای استاندارد در مرطوبترین شرایط استفاده می شوند، به دست می آید. b: برای هر عملیات جداگانه، مقادیر کاهش عملکرد ($Mg \cdot km$) برای مقدار تنظیم شده در وسط محدوده در ستون B آورده شده است

تهاجمی^{۲۸} صورت گرفت، ارزش کل هزینه های اضافی ناشی از افزایش فشردگی خاک در لایه سطحی، تحت الارض و بیش از ۴۰ سانتی متر، ۱۷/۸٪ ارزش کل محصول برآورد شد. با مجموع هزینه های اضافی خاک ورزی در سالهای بعدی این هزینه ها به ۲۰/۴٪ ارزش کل محصول افزایش یافت. منظور از لایه سطحی و تحت الارض به ترتیب اعماق ۰-۲۵ و ۲۵-۴۰ سانتی متری خاک بود. با افزایش ارزش محصول و کاهش درصد رس و پخش کود به روش غیرتهاجمی^{۲۹} مقدار این خسارات کاهش یافت (جدول ۸). در روش غیرتهاجمی، فشار وارد بر زمین از طریق دستگاه پخش کننده کود ۸۰ کیلو پاسکال و عرض پخش ۱۲ متر بود. همچنین پخش کود زمانی انجام گرفت که خاک به خوبی خشک شده بود (پس از یک دوره دو هفته ای بدون بارندگی در مزرعه ای بدون پوشش گیاهی که قبلاً رطوبت آن تا حد ظرفیت مزرعه کاهش یافته بود). در مورد دوم (روش خیلی تهاجمی) فشار وارد بر زمین از طرف کودپاش ۲۰۰ کیلو پاسکال، عرض پخش شش متر بود و پخش در خاک مرطوب (یک یا دو روز پس از بارندگی شدید) انجام گرفت (Hakanson, 2005).

مقدار کاهش عملکرد بسته به فشار لاستیک، مقدار رطوبت خاک و درصد رس متفاوت است. با افزایش فشار لاستیک، درصد رس و مرطوب تر شدن بیشتر از حد FC، کاهش عملکرد تشدید شد. یافته های هاکانسون (Hakanson, 2005) نشان می دهد موقعی که فشار لاستیک ۱۵۰ کیلو پاسکال، رطوبت در حد FC و رس ۱۰ درصد بود، کاهش عملکرد ۱/۸ درصد بود. در شرایط مشابه، با مرطوب تر شدن خاک مقدار کاهش عملکرد به ۲/۵ درصد رسید. هنگامی که با همان فشار و حد رطوبتی FC، مقدار رس ۴۰ درصد بود این کاهش عملکرد به ۷/۱ درصد و با مرطوب تر شدن خاک در شرایط مشابه به ۹/۸ درصد افزایش یافت. در فشار لاستیک ۲۵۰ کیلو پاسکال در شرایط مشابه مقدار این کاهش عملکرد بیشتر نیز شد، طوریکه با درصد رس ۴۰ و خاک مرطوب مقدار این کاهش به ۱۲ درصد رسید. ارزش محصول کاهش یافته در بدترین حالت (۱۲ درصد کاهش) و با ارزش محصول ۱۵۰۰ یورو در هکتار در سال، معادل ۱۸۱ یورو در هکتار برآورد شد. موقعی که ارزش سالانه محصول ۵۰۰ یورو در هر هکتار و مقدار رس در خاک ۵۰٪ بود و پخش کود به صورت خیلی

²⁹ -In a non aggressive way

²⁸ -In a very aggressive way

جدول ۸- هزینه پیش‌بینی شده کاهش عملکرد محصول و افزایش هزینه‌های خاک‌ورزی ناشی از فشردگی خاک با مقادیر مختلف رس هنگام پخش کود در مزارع به روش غیرتهاجمی و خیلی تهاجمی

Table 8- Predicted crop yield losses and increased tillage costs caused by soil compaction with various clay contents when spreading manure in fields carried out either in a non-aggressive way or in a very aggressive way (Hakanson, 2005)

پخش خیلی تهاجمی			پخش غیرتهاجمی			نوع تأثیرات
50%	30%	10%	50%	30%	10%	
8.9	8.9	8.9	2.8	2.8	2.8	۱- تأثیر در لایه شخم در همان سال (%)
7.7	4.6	1.5	0.1	0.6	0.2	۲- اثرات بعدی در لایه شخم (%)
0.9	0.9	0.9	0.1	0.1	0.1	۳- اثرات در عمق 25 - 40 سانتی‌متر (%)
0.3	0.3	0.3				۴- اثرات در عمق بیش از 40 سانتی‌متر (%)
17.8	14.7	11.6	3.9	3.5	3.1	کاهش عملکرد کل (مجموع درصد 4 مورد فوق)
کاهش عملکرد کل (یورو بر هکتار)						
89	73	58	19	17	15	در ارزش محصول سالانه ۵۰۰ یورو بر هکتار
178	147	116	39	35	31	در ارزش محصول سالانه ۱۵۰۰ یورو بر هکتار
13	9	5	6	4	2	هزینه‌های شخم افزایش یافته (یورو بر هکتار)
کل هزینه‌ها (کاهش عملکرد + هزینه‌های شخم افزایش یافته، یورو بر هکتار)						
102	82	63	25	21	17	در ارزش محصول سالانه ۵۰۰ یورو بر هکتار
191	156	121	45	39	33	در ارزش محصول سالانه ۱۵۰۰ یورو بر هکتار

مرتبط با انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از فشردگی خاک بین ۳۳۱۰ و ۳۹۵۰ کرون در هکتار متغیر بود و با افزایش تراکم تا ۱۷ درصد افزایش یافت که حداکثر آن در بار چرخ متوسط مشاهده شد. هزینه‌های آبشویی نیتروژن ۳۴/۵ درصد افزایش یافت. هزینه‌های مرتبط سیل، کمتر و در محدوده ۳۰ تا ۸۰ کرون در هکتار بود. هزینه‌های زیست‌محیطی تراکم تحت تأثیر انتشار گازهای گلخانه‌ای بود (جدول ۹) (Parvin et al., 2022).

یافته‌های پروین و همکاران (Parvin et al., 2022) نشان داد فشردگی ناشی از به‌کارگیری ماشین‌آلات برداشت سنگین با وزن نه مگاگرم (تن)، باعث کاهش عملکرد گندم به میزان ۴/۵ درصد در سوئد گردید و با میانگین قیمت تولید گندم ۱۴۶۰ کرون به ازای هر تن دانه گندم، درآمد کشاورز از حدود ۱۰۱۲۰ کرون در هکتار در خاک متراکم نشده به ۹۶۷۰ کرون در هکتار برای خاک متراکم شده کاهش یافت. همچنین هزینه‌های اجتماعی

جدول ۹ - درآمد، هزینه‌های برداشت و هزینه‌های آسیب‌های زیست‌محیطی برای اندازه‌های مختلف دروگر (وزن چرخ‌ها) (کرون بر هکتار)

Table 9- Income, harvesting costs and costs for environmental disservices for different harvest sizes (wheels load)

SEKha⁻¹ (Parvin et al., 2022)

وزن چرخ‌ها (مگاگرم)									
9	8	7	6	5	4	3	2	1	
9670	9753	9828	9895	9955	10007	10052	10089	10118	درآمد دانه
1055	1121	1188	1255	1322	1389	1455	1522	1589	هزینه‌های برداشت
8615	8631	8639	8640	8633	8619	8596	8566	8529	درآمد خالص کشاورز
									هزینه‌های زیست‌محیطی ناشی از:
70	72	72	70	66	59	50	39	25	رواناب (سیل)
2014	2014	1924	1834	1744	1654	1564	1473	1383	آبشویی نیتروژن
3539	3739	3873	3943	3947	3886	3759	3568	3311	انتشار گازهای گلخانه‌ای معادل CO ₂
5713	5825	5870	5847	5756	5598	5373	5080	1719	هزینه های زیست‌محیطی کل
2902	2806	2770	2794	2877	3020	۳۲۲۴	3487	3809	درآمد خالص برای جامعه

مقایسه تأثیر انواع سامانه‌های خاک‌ورزی بر فشردگی خاک و عملکرد محصول

از دهه ۱۹۵۰ اشکال مختلف خاک‌ورزی حفاظتی و بی‌خاک‌ورزی (NT^{۳۰}) با حداقل بهم خوردگی خاک در سراسر جهان معرفی شده است. روش‌های کشاورزی حفاظتی و کاهش خاک‌ورزی روش‌های مؤثری برای کنترل فرسایش خاک و حفظ آب هستند، همچنین به ترسیب کربن و کاهش هزینه‌های پولی و انرژی کمک می‌کنند، اما مشکلات مربوط به کنترل علف‌های هرز، افزایش کربن آلی خاک و طبقه‌بندی مواد مغذی، خطرات تراکم، رواناب و اسیدی شدن را نیز نباید نادیده گرفت (Voltr et al., 2021). از سوی دیگر سامانه‌های خاک‌ورزی متداول حاصلخیزی خاک و بهره‌وری زراعی را بهبود می‌بخشد، اما در بلندمدت، کاهش کیفیت ساختار خاک و افزایش حساسیت به سله بستن، تراکم و فرسایش مشاهده می‌شود (Voltr et al., 2021). در یک آزمایش که در صربستان غربی، از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ توسط بوبردزیک و همکاران (Biberdzic et al., 2019) انجام شد، به تأثیر سامانه‌های مختلف خاک‌ورزی بر فشردگی خاک و عملکرد دانه‌های

گندم زمستانه (*Triticum aestivum* L.) در یک خاک ورتی‌سول پرداخته شد. چهار سامانه خاک‌ورزی شامل (خاک‌ورزی متداول (CT^{۳۱})، کم‌خاک‌ورزی (RT^{۳۲})، خاک‌ورزی با دیسک (RT^{۳۳}) و بی‌خاک‌ورزی (NT) در این آزمایش استفاده شد. بیشترین میانگین عملکرد گندم در سامانه خاک‌ورزی متداول (۴۰۳۳ کیلوگرم در هکتار) و به‌طور معنی‌داری بیشتر از عملکرد به دست آمده در سایر سامانه‌های خاک‌ورزی بود و کمترین عملکرد (۲۶۸۰ کیلوگرم در هکتار) در سامانه NT به دست آمد. تفاوت معنی‌داری در عملکرد گندم بین سامانه‌های RT و RT₁ وجود نداشت. همبستگی منفی قوی بین میانگین عملکرد گندم و فشردگی خاک وجود داشت (r=0.85). میانگین عملکرد در سامانه CT، ۱۲/۴۳٪ تا ۲۹/۵۱٪ بالاتر از سامانه‌های NT و RT بود (Voltr et al., 2021). این نتایج با یافته‌های گزارش‌شده توسط شهزاد و همکاران (Shahzad et al., 2016) مطابقت دارد که در سامانه CT عملکرد دانه گندم را ۹/۸٪ تا ۱۹/۲٪ بالاتر از سامانه‌های RT و NT به دست آوردند. دای و همکاران (Dai et al., 2019) عملکرد گندم در سامانه NT را در مقایسه با سامانه

³³ -Disc harrowing³⁰ -No tillage³¹ -Conventional tillage³² -Reduced tillage

CT، ۶ درصد کمتر گزارش کردند. راتونی و همکاران (Rátonyi et al., 2005) کاهش عملکرد دانه (۳۳-۸ درصد) پس از کاشت مستقیم را ناشی از فشردگی بیشتر خاک در لایه عمقی (۲۵-۱۵ سانتی متر) گزارش کردند در حقیقت مدیریت پایدار خاک ممکن است سرمایه گذاری باشد که در کوتاه مدت به قیمت بازده کمتر تمام شود اما کیفیت خاک را در آینده افزایش می دهد. از این رو، دستیابی به ارزش اقتصادی بالای زمین در بلندمدت، با ایجاد مدیریت پایدار خاک، با حداقل از دست دادن درآمد امکان پذیر خواهد بود. حداکثر ارزش اقتصادی بلندمدت در صورتی به دست می آید که حداکثر استفاده از پتانسیل یک خاک به روشی پایدار صورت گیرد (Kik et al., 2021). نتایج مشابه توسط روئیس و همکاران (Ruis et al., 2023) پس از جایگزینی آیش با نخود بهاره در آمریکا ارائه شد که نتیجه گرفتند اگرچه این جایگزینی عملکرد محصول بعدی را به میزان ۲۵-۱۵ درصد در مقایسه با آیش کاهش داد. با این حال، تجزیه و تحلیل اقتصادی نشان داد که درآمد خالص را ۳۰۳-۱۴۴ دلار در هکتار بهبود بخشید و مقدار D_b را ۰/۱ گرم بر سانتی متر مکعب کاهش داد (Ruis et al., 2023). میرزاوند و مرادی طالب بیگی (Mirzavand & Talebbeigi, 1991) نشان دادند سامانه RT عملکرد بالاتری از گندم و ذرت را در شیراز تولید کرد که به ترتیب ۹۱۹۰ و ۱۴۹۹۶ کیلوگرم در هکتار بود. یافته های این پژوهش نشان داد جایگزینی RT با CT و یا NT می تواند تا حد زیادی عملکرد محصول را بهینه کند، فشردگی خاک را کاهش دهد و نفوذ آب را تحت تناوب گندم- ذرت بهبود بخشد. کوپک و همکاران (Copeck et al., 2015) نیز با بررسی تأثیر سامانه های خاک ورزی بر محتوای آب خاک و عملکرد گندم و ذرت به این نتیجه رسیدند که بیشترین عملکرد در سامانه NT حاصل شد که بالاترین محتوای رطوبت را نیز داشت. شهب و همکاران (Shaheb et al., 2023) در یک مطالعه سه ساله با بررسی اثرات فشار باد کم تایر (LTP^{34}) را در مقایسه با

لاستیک های استاندارد، بر عملکرد محصول و اقتصاد مزرعه برای یک تناوب معمولی ذرت- سویا با سه سامانه خاک ورزی شامل خاک ورزی عمیق (DT، ۴۵ سانتی متر)، خاک ورزی کم عمق (ST، ۱۰۰ سانتی متر) و سامانه NT در دو مزرعه ۲۰۰ و ۸۰۰ هکتاری، دریافتند سامانه LTP عملکرد ذرت را در دو سال ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ به ترتیب ۴/۵ و ۲/۷ درصد و عملکرد سویا را ۳/۷ درصد در سال ۲۰۱۸ افزایش داد. درآمد سالانه برای هر دو مزرعه افزایش یافت. سود سالانه هر هکتار استفاده از سامانه های LTP برای DT، ST، و NT به ترتیب ۶۴، ۲۹ و ۳۳ دلار برای یک مزرعه ۲۰۰ هکتاری و به ترتیب ۶۶، ۳۱ و ۳۶ دلار برای یک مزرعه ۸۰۰ هکتاری بود. تیمار DT بیشترین میزان عبور و مرور میدانی را دارد و بنابراین از کاهش تراکم با LTP بیشترین سود را می برد (Shaheb et al., 2023).

تأثیر سامانه های خاک ورزی بر انتشار گازهای گلخانه ای و بازده اقتصادی محصول

ولتر و همکاران (Voltr et al., 2021) نشان دادند که همه محصولات مورد مطالعه به جز چغندر قند، در صورت بکارگیری سامانه RT نسبت به CT، بر اساس ارزیابی تولید گازهای گلخانه ای (GHG^{35}) به پارامترهای اقتصادی بهتری در تولید دست یافتند. همچنین با به کارگیری سامانه RT انتشار GHG کاهش یافت. مقدار این کاهش به طور متوسط در هر تن در تمام محصولات مورد مطالعه شش درصد بود. بیشترین کاهش CO_2 ، برای چاودار و جو (۱۳ درصد) و جو بهاره (هشت درصد) به دست آمد. کاهش عملکرد محصول در سامانه RT نسبت به CT از حدود ۱٪ (جو بهاره) تا ۴٪ (ذرت دانه) متغیر است. کاهش هزینه هر تن در محدوده ۱۴ درصد (چاودار) تا دو درصد (ذرت علوفه ای) بود. میزان ذخیره انرژی در سامانه RT در خشخاش هشت، کلزا چهار، جو دوسر سه، چاودار سه و جو بهاره و زمستانه دو درصد بود. ارزیابی کلی سامانه های خاک ورزی نشان داد که اگرچه استفاده از

³⁴ -Low tire inflation pressure

³⁵ -Greenhouse gases

سامانه RT منجر به صرفه‌جویی در مصرف انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای گردید، باین‌حال، باعث افزایش فشردگی خاک در لایه سطحی و زیرسطحی و متعاقباً مصرف کود نیتروژنی در ذرت دانه‌ای و علوفه‌ای، کلزا و جو زمستانه شد. افزایش مصرف کودهای نیتروژنی اثرات منفی زیست‌محیطی بر کیفیت آب‌های زیرزمینی و سطحی دارد (Voltr et al., 2021). همچنین هو و همکاران (Hu et al., 2021) در یک پژوهش انجام‌شده در نیوزیلند گزارش کردند تراکم خاک ناشی از عبور و مرور ماشین‌آلات باعث افزایش انتشار N_2O به میزان ۱۹ الی ۱۳۰۰٪ می‌شود. طبق گزارش گائو و همکاران (Gao et al., 2024) که اثر متقابل فشردگی و فرسایش خاک بر انتشار گاز CO_2 را مورد مطالعه قرار دادند، در محل فرسایش، فشردگی بالا (HP) در مقایسه با حالت بدون فشردگی (LP)، انتشار CO_2 را به ترتیب ۲۹/۴ و ۳۶/۷ درصد در دمای ۱۵ و ۲۵ درجه سانتی‌گراد افزایش داد. برعکس، در محل رسوب، HP انتشار CO_2 را به ترتیب ۲۷/۸ و ۳۱/۳ درصد در مقایسه با NP در دماهای مشابه کاهش داد. LP اثر قابل‌توجهی بر انتشار CO_2 در سایت‌های فرسایشی و رسوبی نداشت (Gao et al., 2024). این مشاهدات با یافته‌های وانگ و همکاران (Wang et al., 2014) مطابقت دارد.

عملکرد محصولات مختلف زراعی و همچنین ارزش اقتصادی زمین اثرات مستقیمی دارند. افزایش هزینه‌های تولید ناشی از فشردگی خاک متأثر از ویژگی‌های فیزیکی و کیفی خاک و اقلیم متغیر بوده و اثرات منفی آن بر کاهش عملکرد به‌طور میانگین به میزان ۲۲ درصد برآورد شده است. نتایج تحقیقات بیانگر این واقعیت است که فشردگی خاک ناشی از خاک‌ورزی نامناسب، هزینه‌های تولید را در محدوده ۲۱-۱۷ یورو بر هکتار در سال افزایش می‌دهد. این، تحت شرایطی است که هزینه تولید به ازای هر تن محصول در سامانه کم‌خاک‌ورزی حدود ۱۴-۱ درصد برای محصولات مختلف کاهش می‌یابد. مدیریت پایدار خاک شامل به حداقل رساندن تراکم خاک با استفاده از ماشین‌های با وزن کم و لاستیک‌هایی با سطح تماس بالا، افزایش مواد آلی خاک و به حداقل رساندن عملیات خاک‌ورزی در مکش ماتریک مناسب خاک، به بهبود کیفیت خاک منجر می‌گردد. در ایران پژوهشی در خصوص تأثیر افزایش فشردگی خاک بر ارزش اقتصادی زمین صورت نگرفته است. بنابراین، پیشنهاد می‌شود روابط کمی بین فشردگی خاک ناشی از بکارگیری ادوات مختلف کشاورزی در شرایط اقلیمی و بافت‌های مختلف خاک صورت گرفته و مناسب‌ترین سامانه خاک‌ورزی برای مناطق مختلف معرفی شود.

نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش‌های به انجام رسیده نشان داد که سامانه‌های مختلف خاک‌ورزی، بر میزان فشردگی خاک،

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید نویسندگان مقاله است.

References

1. Alakukku, L., 2000. Response of annual crops to subsoil compaction in a field experiment on clay soil lasting 17 years. *Advances in Geoecology*. 32, pp.205–208.
2. Bhatta, P., Girib, P.R. and Naparic, B., 2024. Soil compaction and its impact on soil properties, microbiome, greenhouse gas emission and root growth. *Big Data in Agriculture (BDA)* 6(1). pp. 66-69. <http://doi.org/10.26480/bda.01.2024.66.69>.
3. Biberdzic, M., Barac, S., Lalevic, D., Djikic, A., Prodanovic, D., and Rajicic, V., 2019. Influence of soil tillage system on soil compaction and winter wheat yield. *Chilean Journal of Agriculture Research*, 80. pp. 80–89.
4. Bicki, T.J., and Siemens, J.C., 1990. Crop response to wheel compaction. In Proc. ASAE Summer Meeting, Columbus. OH. pp. 24-27.

5. Botta, G.F., Tolon-Becerra, A., Lastra-Bravo, X., and Tourn, M., 2010. Tillage and traffic effects (planters and tractors) on soil compaction and soybean (*Glycine max L.*) yields in Argentinean pampas. *Soil and Tillage Research*, 110 (1), pp. 167–174.
6. Butorac, A., 1982. Response of summer oats (*Avena sativa L.*) and winter rye (*Secale cereale L.*) in model experiments to soil compaction and fertility. *Poljopr. Znan. Smotra*. 59, pp. 225-232.
7. Cannell, R.Q. 1977. Soil aeration and compaction in relation to root growth and soil management. *Applied Biology*, 2, pp. 1–86.
8. Carr, M. K. V., and Dodds, S. M., 1983. Some effects of soil compaction on root growth and water use of lettuce. *Experimental. Agricukture*, 19, pp. 117-130.
9. Copeck, K., Filipovic, D., Husnjak, S., Kovacev, I., and Kosutic, S., 2015. Effects of tillage systems on soil water content and yield in maize and winter wheat production. *Plant, Soil and Environment*, 61(5), pp.213-219.
10. Croissant, R.L., Schwartz, H.F. and Ayers. P.D., 1988. Soil compaction losses in pinto beans. *Annual Report of the Bean Improvement Cooperative*. 31, pp.58-61. Colorado State University, Fort Collins, CO.
11. Dai, X., Li, Y., Ouyang, Z., Wang, H., and Wilson, G.V., 2013. Organic manure as an alternative to crop residues for no-tillage wheat-maize systems in North China Plain. *Field Crops Research*. 149(1), pp. 141-148. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.04.027>.
12. Drewry, J.J., Littlejohn, R.P., Paton, R.J., Singleton, P.L., Monaghan, R.M., and Smith, L.C., 2004. Dairy pasture responses to soil physical properties. *Australian Journal of Soil Research*, 42, pp. 99–105. <https://doi.org/10.1071/SR03055>
13. Flocker, W.J., and Nielsen, D.R., 1962. The absorption of nutrient elements by tomatoes associated with levels of bulk density. *Soil Science Society of America Journal* 26, pp.183-186. <https://doi.org/10.2136/sssaj1962.03615995002600020025x>.
14. Frene, J.P., Pandey, B.K. and Castrillo, G., 2024. Under pressure: elucidating soil compaction and its effect on soil functions. *Plant and Soil*, pp.1-12.
15. Gliński, J. and Lipiec, J., 1990. Soil Physical Conditions and Plant Roots. *CRC Press, Boca Raton, FL, U.S.A.*
16. Galambošová, J., Macák, M., Rataj, V., Antille, D.L., Godwin, R.J., Chamen, W.C.T., and Chlupík, J., 2017. Field evaluation of controlled traffic farming in Central Europe using commercially available machinery. *Transactions of the ASABE*. 60(3), pp.657–669. <https://doi: 10.13031/trans.11833>
17. Gao, H., Song, X., Wu, X., Zhang, N., Liang, T., Wang, Z., Yu, X., Duan, C., Han, Z. and Li, S., 2024. Interactive effects of soil erosion and mechanical compaction on soil DOC dynamics and CO2 emissions in sloping arable land. *Catena*, 238, p.107906.
18. Gregorich, E.G., Lapen, D.R., Ma, B.L., McLaughlin, N.B., and Vanden Bygaart, A.J., 2011. Soil and crop response to varying levels of compaction, nitrogen fertilization, and clay content. *Soil Science Society of America Journal*. 75(4), pp. 1483–1492. <https://doi.org/10.2136/sssaj2010.0395>
19. Godwin, R.J., Misiewicz, P.A., Smith, E.K., Millington, W.A.J., White, D.R., Dickin, E.T., and Chaney, K., 2017. Summary of the effects of three tillage and three traffic systems on cereal yields over a four-year rotation. *Aspects of Applied Biology*. 134, pp. 233–241. <https://doi:10.13031/aim.201701652>.
20. Hakanson, I., 2005. Machinery-induced compaction of arable soils: Incidence–consequences–counter measures. In *Reports from the Division of Soil Management*; Swedish University of Agricultural Sciences: Uppsala, Sweden; no 109.
21. Hakansson, I., Voorhees, W.B. and Riley, H., 1988. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. . *Soil and Tillage Research*. 11, pp. 239-282. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(88\)90003-7](https://doi.org/10.1016/0167-1987(88)90003-7).
22. Hebblethwaite, P.D., and McGowan, M., 1980. The effects of soil compaction on the emergence, growth and yield of sugar beet and peas. *Journal of the science of food and agriculture*. 31, pp.1131-1141. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740311103>.

23. Hu, W., Drewry, J., Beare, M., Eger, A. and Müller, K., 2021. Compaction induced soil structural degradation affects productivity and environmental outcomes: A review and New Zealand case study. *Geoderma*, 395, p.115035.
24. Iler, G.S. and Stevenson, C.K., 1991. The effect of soil compaction on the production of processing vegetables and field crops- A review. Ridge Town College of Agricultural Technology, soils section, Ridge town, Ontario, Canada.
<http://hdl.handle.net/10214/14039>
25. Jamali, H.; Nachimuthu, G., Palmer, B.; Hodgson, D., Hundt, A. Nunn, C., and Braunack, M., 2021. Soil compaction in a new light: Know the cost of doing nothing—a cotton case study. *Soil and Tillage Research*, 213, pp. 105-158.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105158>.
26. Katoch, K.K., Aggarwal, G.C., and Garg, F.C., 1983. Effect of nitrogen, soil compaction and moisture stress on nodulation and yield of soybean. *Journal of. Indian Society Soil Science*, 31, pp. 215-225.
27. Kayombo, B., and Lal, R., 1994. Responses of tropical crops to soil compaction. , pp.287–316. In BD Soane and C van Ouwerkerk (eds). *Soil compaction in crop production*. Elsevier Science Publishers B.V.: Amsterdam, Netherlands.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-88286-8.50021-0>.
28. Kik, M.C., Claassen, G.D.H., Ros, G.H., Meuwissen, M.P.M., Smit, A.B. and Saatkamp, H.W., 2024. FARManalytics—A bio-economic model to optimize the economic value of sustainable soil management on arable farms. *European Journal of Agronomy*, 157, p.127192.
29. Lepore, E., Schmidt, O., Fenton, O., Tracy, S., Bondi, G. and Wall, D.P., 2024. Traffic induced compaction and physical quality of grassland soil under different soil moisture deficits. *Soil and Tillage Research*, 244, p.106205.
30. Lindemann, W.C., Ham, G.E. and Randall G.W., 1982. Soil compaction effects on soybean nodulation, N₂ (C₂H₄) fixation and seed yield. *Agronomy. Journal*, 74, pp.307- 311.
<https://doi.org/10.2134/agronj1982.00021962007400020012x>.
31. Lipiek, J., Medvedev, V.V., Birkas, M., Dumitru, E. Lyndina, T.E., Rousseva, S. and Fulajtár, E., 2003. Effect of soil compaction on root growth and crop yield in Central and Eastern Europe. *International Agrophysics*, 17, pp. 61–69.
32. Mielke, L.N., and Jones, A.J., 1990. Effect of soil compaction and subsoiling on corn and soybean yield. *Agron. Abstr.* 321.
33. Mileusnić, Z.I., Saljnikov, E., Radojević, R.L. and Petrović, D.V., 2022. Soil compaction due to agricultural machinery impact. *Journal of Terramechanics*, 100, pp.51-60.
34. Mirzavand, J. and Moradi-Talebbeigi, R., 2020. Relationships between field management, soil compaction, and crop productivity. *Archieves of Agronomy and Soil Science*. 67(5), pp.675–686. **<https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1749267>**
35. Parvin, N., Coucheney, E., Gren, M., Andersson, H., Elofsson, K., Jarvis, N. and Keller, T., 2022. On the relationships between the sizes of agricultural machinery, soil quality and net revenues for farmers and society. *Soil Security*, 6, p.100044.
36. Piccoli, I., Seehusen, T., Bussell, J., Vizitu, O., Calciu, I., Berti, A., Börjesson, G., Kirchmann, H., Kätterer, T., Sartori, F. and Stoate, C., 2022. Opportunities for mitigating soil compaction in Europe—Case studies from the soil care project using soil-improving cropping systems. *Land*, 11(2), p.223. **<https://doi.org/10.3390/land11020223>**
37. Raghavan, G.S.V., McKyes, E., and Beaulieu, B., 1978. Clay soil compaction due to wheel slip. *Transactions of the American. Society of Agricultural Engineers*. 21: 646-649.
<https://doi.org/10.13031/2013.35359>.
38. Rátonyi, T., Huzsvai, L., Nagy, J., and Megyes, A., 2005. Evaluation of soil tillage systems in maize production. *Acta Agronomica Hungarica*, 53, pp.53-57.
<https://doi.org/10.1556/AAgr.53.2005.1.7>
39. Reeder, R., 1990. Soil compaction update: Preparing for the 1990's. The Ohio State University, Cooperative Extension Service, Columbus, OH.

40. Ruis, S.J., Stepanovic, S. and Blanco-Canqui, H., 2023. Intensifying a crop–fallow system: impacts on soil properties, crop yields, and economics. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 38, p.e42.
41. Shaheb, M.R., 2020. A study on the effect of tire inflation pressure on soil properties, growth and yield of maize and soybean in Central Illinois. *Ph.D. thesis. Harper Adams University, Newport, Shropshire, United Kingdom.*
<https://hau.repository.guildhe.ac.uk/id/eprint/17769>
42. Shaheb, M.R., Misiewicz, P.A., Godwin, R.J., Dickin, E., White, D.R., Lowenberg-DeBoer, J., Shearer, S.A. and Grift, T.E., 2023. An economic appraisal of the effect of tire inflation pressure for alternative tillage systems on a silty clay loam soil. *Agronomy Journal*, 115(6), pp.3144-3161.
43. Shaheb, M.R.; Venkatesh, R., and Shearer, S.A.A., 2021. Review on the Effect of Soil Compaction and its Management for Sustainable Crop Production. *Journal of. Biosystems Engineering*, 46, pp. 417–439. **<https://doi.org/10.1007/s42853-021-00117-7>**.
44. Shahzad, M., Farooq, M., Jabran, K., Yasir, T.A., and Hussain, M., 2016. Influence of various tillage practices on soil physical properties and wheat performance in different wheat-based cropping systems. *International Journal of Agriculture and Biology*. 18, pp. 821-829. **<https://doi: 10.17957/IJAB/15.0178>**.
45. Smith, E.K., Misiewicz, P.A., Girardello, V., Arslan, S., Chaney, K., White, D.R., and Godwin, R.J., 2014. Effects of traffic and tillage on crop yield (winter wheat *Triticum aestivum*) and the physical properties of a sandy loam soil. In *ASABE and CSBE/SCGAB Annual International Meeting, Montreal, Canada, July 13–16*, 141912652, 1–14. St. Joseph, MI. **<https://doi: 10.13031/aim.20141912652>**.
46. Smittle, D.A., and Williamson, R.E., 1977. Effect of soil compaction on nitrogen and water use efficiency, root growth, yield and fruit shape of pickling cucumbers. *Journal of American Society Horticultural Science*, 102, pp. 822-825.
47. Soane, G.C., Godwin, R.J., and Spoor, G. 1986. Influence of deep loosening techniques and subsequent wheel traffic on soil structure. *Soil and Tillage Research*, 8, pp.231-237. **[https://doi.org/10.1016/0167-1987\(86\)90336-3](https://doi.org/10.1016/0167-1987(86)90336-3)**
48. Stirzaker, R.J., Passioura, J.B., and Wilms, Y., 1996. Soil structure and plant growth: impact of bulk density and biopores. *Plant and Soil*. 185, 151–162. **<https://doi.org/10.1007/BF02257571>**.
49. Stranks, S.N., 2006. The effects of tyre systems on the depth and severity of compaction. *MSc. Thesis, Cranfield University, Cranfield, Bedford, United Kingdom.*
<http://hdl.handle.net/1826/1215>
50. Tietjens, F., Schröer, D. and Latacz-Lohmann, U., 2024. Farmers' preferences for the design of a slurry hosing support scheme to combat soil compaction: Insights from a discrete choice experiment in Germany. *Agricultural Systems*, 219, p.104030.
51. Trowse, A.C., Jr., 1979. Effect of soil bulk density on root elongation. *Zeszyty Problemowe Postepow Nauk Rolniczych*, 220, pp. 349-359.
52. Voltr, V., Wollnerová, J., Fuksa, P., and Hruška, M., 2021. Influence of Tillage on the Production Inputs, Outputs, Soil Compaction and GHG Emissions. *Agriculture*, 11, pp. 456. **<https://doi.org/10.3390/agriculture11050456>**.
53. Voorhees, W.B., 1983. Relative effectiveness of tillage and natural forces in alleviating wheel-induced soil compaction. *Soil Science Society of America. Journal*, 47, pp. 129-133. **<https://doi.org/10.2136/sssaj1983.03615995004700010026x>**.
54. Wang, X., Cammeraat, E.L., Cerli, C. and Kalbitz, K., 2014. Soil aggregation and the stabilization of organic carbon as affected by erosion and deposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 72, pp.55-65.
55. Wittsell, L.E., and Hobbs, J.A. 1965. Soil compaction effects on field plant growth. *Agronomy. Journal*, 57, pp.534-54. **<https://doi.org/10.2134/agronj1965.00021962005700060005x>**.
56. Wolkowski, R., and Lowery, B., 2008. Soil compaction: Causes, concerns, and cures (A3367).Madison, WI: University of Wisconsin Cooperative Extension.

57. Zabrodskiy, A., Šarauskis, E., Kukharets, S., Juostas, A., Vasiliauskas, G., Andriušis, A., 2021. Analysis of the Impact of Soil Compaction on the Environment and Agricultural Economic Losses in Lithuania and Ukraine. *Sustainability*. 13, pp. 7762.

بررسی و تحلیل برخی از مهم‌ترین چالش‌های اراضی کشاورزی استان خوزستان (با تأکید بر محدودیت‌های منابع خاک)

ابوالفضل آزادی* , علیرضا جعفرنژادی و محی‌الدین گوشه

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

a.azadi@areeo.ac.ir

دانشیار پژوهش، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران.

arjafarnejadi@gmail.com

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

amgoosheh@gmail.com

دریافت: مرداد ۱۴۰۳ و پذیرش: تیر ۱۴۰۴

چکیده

مطالعه وضعیت خاک در اراضی کشاورزی و منابع طبیعی برای مدیریت بهینه منابع و رسیدن به بهره‌وری اقتصادی بیشینه ضروری است. لذا در این مقاله ضمن بررسی وضعیت فعلی خاک‌های استان خوزستان، مهم‌ترین چالش‌های موجود و محدودیت‌های منابع خاک در این استان نیز بیان شده است. نتایج بررسی‌های انجام‌شده وضعیت خاک‌های استان در یک دوره ده‌ساله (۱۳۹۰-۱۴۰۰) با برداشت بالغ‌بر حدود ۱۱۰۰ نمونه سطحی نشان داده است که شوری خاک اراضی کشاورزی در حال افزایش و غلظت قابل جذب عناصر غذایی و همچنین کربن آلی عمده‌تاً کاهش یافته است؛ که این موضوع بیانگر آن است که با وجود انجام تمام اقدامات مدیریتی در این استان، وضعیت خاک آن برای تولید و بهره‌برداری، چندان مناسب نبوده است. این موضوع عمده‌تاً به دلیل سوء مدیریت و عدم برنامه‌ریزی مناسب و پایدار مدیریت خاک است. همچنین بررسی نتایج وضعیت پراکنش تعداد کلاس‌های اراضی تعیین‌شده در هر سال که پس از بررسی حدود ۲۰۰ نیمرخ مطالعاتی حاصل از ۱۴۰ مورد بازدید اراضی استخراج شد، نشان می‌دهد که بیشترین درخواست‌های تغییر کاربری اراضی هر ساله به ترتیب مرتبط با احداث صنایع، کارگاه‌ها و کارخانه‌ها، طرح‌های گردشگری، پرورش ماهی و میگو، جهش ملی مسکن و نهایتاً احداث گلخانه است. دامنه تغییرات کلاس‌های طبقه‌بندی اراضی بررسی‌شده از کلاس‌های I (قابل کشت) تا VI (غیر قابل کشت) با تحت کلاس‌های مختلف متغیر است ولی بیشترین پراکنش کلاس‌ها در هر سال مربوط به کلاس‌های V (قابلیت کشت نامشخص و دارای محدودیت‌های زیاد) و III (قابل کشت با محدودیت‌های متوسط) است. لذا غالب کلاس‌های V تفکیک‌شده به‌ویژه در نواحی جنوبی و غربی استان (مانند شهرستان‌های آبادان، ماهشهر و ...) و مربوط به محدودیت شوری و قلیائیت خاک است. لذا جهت جلوگیری از تغییر کاربری و حفظ و مدیریت بهتر اراضی دارای مشکل شوری و قلیائیت، بومی‌سازی و بازنگری شیوه‌نامه مورد استفاده جهت تعیین قابلیت کشت اراضی کشاورزی و اعمال روش‌های مبتنی بر یافته‌های علمی و تجربیات کارشناسی دقیق ضروری است؛ بنابراین شوری، کمبود مواد آلی، کاهش حاصلخیزی، فرسایش و... از جمله مشکلات عمده خاک‌های استان است و در نتیجه توسعه استقرار حکمرانی خاک و سیاست‌های مرتبط با آن، توسعه سرمایه‌گذاری در مدیریت پایدار خاک، تحقیقات با تأکید بر خاک و آموزش مؤثر و بسط برنامه‌های خاک بایستی در اولویت باشد.

واژه‌های کلیدی: شوری، کاربری اراضی، کشاورزی، محدودیت‌های خاک

* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: a.azadi@areeo.ac.ir

نوع مقاله: مروری



مقدمه

کشور ایران با قرار گرفتن در محدوده خشک و نیمه‌خشک جهان و نیز با توجه به شرایط زمین‌شناسی و پستی و بلندی، دارای محدودیت‌های متنوع و گسترده‌ای در منابع خاک و اراضی است. این محدودیت‌ها با بهره برداری‌های غیراصولی و فشرده در طی چند دهه گذشته، موجب ایجاد چالش‌های فراوانی برای این منابع پایه و در نتیجه به خطر افتادن امنیت غذایی و سلامت جامعه شده است (Asadi et al., 2022). دشت خوزستان از لحاظ زمین‌شناسی جزء یکی از سه منطقه زمین‌شناسی زاگرس است که شامل بخشی از دشت وسیع بین‌النهرین است. رسوبات سطحی این دشت از فرسایش آبی بخش‌های بالا دست و از طریق سیلاب رودخانه‌های بزرگی چون کارون، دز و کرخه به دشت منتقل شده‌اند. شیب کلی دشت با اختلاف ارتفاعی بالغ بر ۴۰۰ متر، در امتداد شمالی جنوبی است. مواد مادری این خاک‌ها از رسوبات آبرفت‌های رودخانه‌ای حاصل شده است که برای هر رودخانه تقریباً دارای شرایط نسبتاً یکسانی است (Jafari and Nadian, 2014) که این خاک‌ها از بخش شمالی تا جنوبی به دلیل توزیع اندازه ذرات دارای اختلافاتی است.

استان خوزستان به دلیل برخورداری از منابع غنی آب‌و خاک از دیرباز همواره به‌عنوان قطب کشاورزی مورد توجه بوده است. از آنجایی که طی سالیان متمادی نواحی با خاک‌های دارای کیفیت بهتر و مرغوب‌تر به زیر کشت رفته است لذا توسعه و اجرای طرح‌های جدید کشاورزی با هدف تولید محصولات کشاورزی و به دنبال آن تأمین غذا برای جمعیت رو به رشد موجب شده است تا بهره‌برداری از اراضی با خاک‌های دارای کیفیت نامناسب‌تر و نامرغوب به ناچار مورد توجه و در دستور کار قرار گیرد. بهره‌برداری بی‌رویه و غیراصولی از چنین خاک‌های شدیداً آسیب‌پذیر و مسئله‌دار در استان خوزستان (به‌ویژه نواحی جنوبی و غرب استان نظیر آبادان، خرمشهر، جنوب اهواز و ...) که عمدتاً شوری و نمک‌های محلول مشکل آن‌ها است،

همان‌طور که تجربه سالیان اخیر نشان داده است، باعث ایجاد آلودگی منابع آب آبیاری و افزایش مجدد املاح و نمک‌های محلول خاک در پایین‌دست و تخریب محیط‌زیست شده است (Zare et al., 2017).

تغییرات اقلیمی کشاورزی را دستخوش تغییر کرده و باعث شده کربن به‌جای خاک در اتمسفر باشد، دنیا در حوزه خاک دچار محدودیت و چالش است و این موضوع فقط مختص استان خوزستان نبوده و یک چالش ملی و جهانی است. به‌طوری‌که جمعیت ایران حدود ۱/۱ درصد جمعیت جهان و سطح کل اراضی کشاورزی آن کمتر از ۰/۴ درصد از اراضی کشاورزی دنیا است. در حال حاضر، سرانه زمین‌های کشاورزی در ایران بر اساس اراضی در چرخه تولید، حدود ۰/۱۶ هکتار است. به عبارتی از ۱۶۵ میلیون هکتار وسعت کشور، تنها حدود ۷۹ میلیون هکتار سطح کشور پوشیده از خاک است و میزان خاک‌های درجه یک اراضی آبی کشور که در حال حاضر فاقد هرگونه محدودیتی حدود ۱/۲ میلیون هکتار است (Roozitalab et al., 2018)، از طرف دیگر در بخشی از کره زمین با محدودیت آب واقع شده‌ایم و قرار گرفتن در کمربند خشک و نیمه‌خشک زمین نیز مزید بر علت است. هر چند که همین منابع اندک خاک به شکل‌های گوناگون از نظر کمی و کیفی دارای روند قهقراپی است. فرسایش خاک، تغییر کاربری اراضی مناسب، گسترش شوری، کاهش بنيه حاصلخیزی، فقر مواد آلی، روش‌های نامناسب شخم و عملیات زراعی، فقدان قوانین و ضوابط جهت استفاده مناسب و جلوگیری از تخریب و آلودگی خاک، ورود آلاینده‌ها به خاک و اثرات ناشی از تغییر اقلیم، از جمله مسائلی هستند که کمیت و کیفیت منابع خاک را تهدید می‌کنند؛ بنابراین در راستای دستیابی به مدیریت پایدار منابع خاک و جلوگیری از اتلاف آن دو استراتژی عمده وجود دارد: ۱- احیا خاک‌ها و اکوسیستم‌های تخریب‌شده ۲- به‌کارگیری فناوری‌های کشاورزی سازگار و بهسازی آن‌ها. به‌منظور نیل به این استراتژی‌ها برخی راهکارهای عملی عبارت‌اند از: الف- جنگل‌کاری و مدیریت پوشش‌های

غربی استان است، تقریباً دارای شیب کم و سه پنجم مساحت کل استان را شامل می‌شود. میانگین بارندگی سالانه ۲۶۶ میلی‌متر و دوره‌ی بارندگی معمولاً بین مهرماه تا اردیبهشت‌ماه است. اندازه‌ی میانگین و بیشینه‌ی دما در دوره‌ی گرما به ترتیب ۳۱/۲ و بیش از ۵۰ درجه سلسیوس است. استان خوزستان از نظر تقسیم‌بندی دوما رتن گسترده شش اقلیم مهم فرا سرد نیمه‌خشک، معتدل مدیترانه‌ای، معتدل خشک بیابانی، گرم نیمه‌خشک، گرم خشک بیابانی و گرم فرا خشک دارد. مهم‌ترین اقلیم استان گرم خشک بیابانی و سپس اقلیم‌های گرم خشک و گرم نیمه‌خشک است (Soleimani et al., 2023).

مسائل و مشکلات موجود در خاک‌های استان خوزستان

استان خوزستان به سبب برخورداری از شرایط اقلیمی متنوع همراه با دمای متوسط سالیانه ۲۴ درجه، جریان رودخانه‌های بزرگ مثل کارون، جراحی، کرخه و دز سهم بالایی در حجم آورد سالیانه آب ایران دارد (معادل ۳۲ میلیارد مترمکعب که رقمی معادل ۳۳ درصد از منابع آب های سطحی کشور است). از سویی دیگر وجود اراضی حاصلخیز و مستعد با مساحتی معادل ۲/۲ میلیون هکتار (۳۴ درصد کل استان) سبب شده، استان خوزستان از لحاظ کشاورزی همواره از ظرفیت و توانایی بالای برخوردار باشد (Banj Shafiei et al., 2020).

وضعیت تکامل خاک‌های استان

شیب کلی دشت خوزستان، شمالی- جنوبی است که این امر، سبب اختلاف ارتفاع بین بخش‌های شمالی و جنوبی دشت می‌گردد. این اختلاف ارتفاع به همراه سطح آب زیرزمینی و سطوح زهکشی درونی و بیرونی متغیر خاک‌ها در بسیاری از بخش‌های دشت خوزستان، تغییراتی را در بافت خاک‌ها، شور و سدیمی شدن آن‌ها، شرایط اکسیداسیون و احیا و تشکیل مائل و غیره ایجاد می‌نماید. علت اصلی فرایند شور و سدیمی شدن اراضی به پست بودن آن نسبت به سطح دریا، عدم امکان زهکشی به واسطه لایه غیرقابل نفوذ، آبیاری بی‌رویه اراضی و تبخیر شدید آب

گیاهی ب- احیا خاک‌های شور، دارای حاصلخیزی پایین و آلوده ج- توسعه روش‌ها و سامانه‌های مناسب شخم مثل شخم حفاظتی، به‌کارگیری مالچ‌ها و دیگر بقایای گیاهی د- مدیریت تلفیقی کودها و استفاده متعادل آن‌ها ذ- استفاده از روش‌های مناسب حفاظت آب شامل آبیاری قطره‌ای، نیمه آبی، بازیابی آب و مدیریت سفره آب زیرزمینی ر- بهبود سامانه‌های زراعی/ تولیدی و غیره (Amini Nesab, 2004).

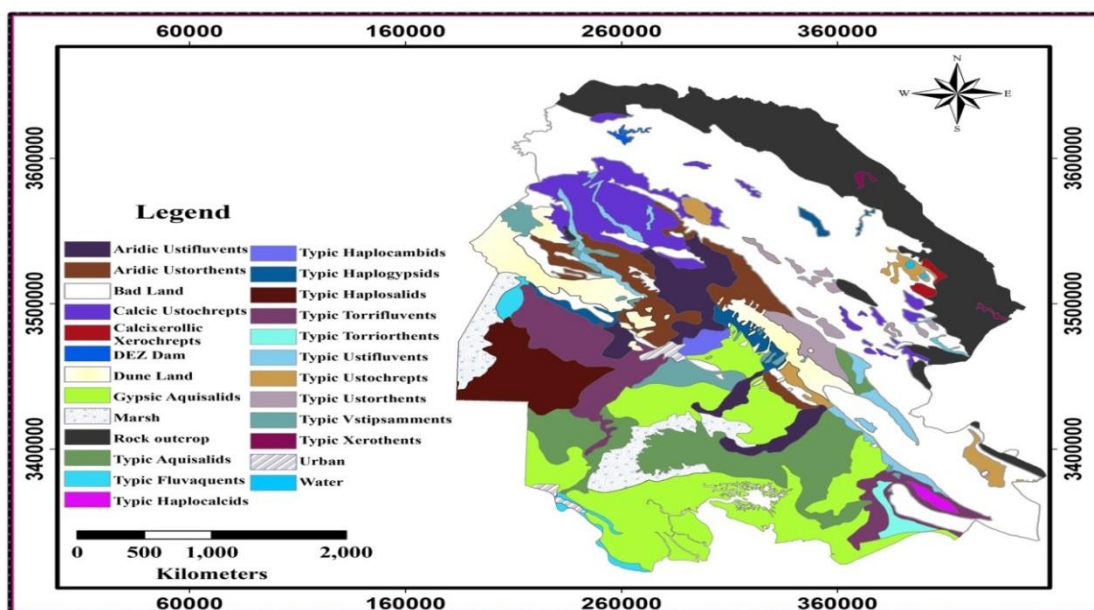
با توجه به مطالب گفته شده اهمیت و ضرورت مطالعه حاضر از آنجا بیش‌ازپیش نمایان می‌شود که بر طبق آخرین گزارش رسمی وزارت جهاد کشاورزی (آمارنامه، ۲۰۲۲)، استان خوزستان با تولید ۱۶/۷۱ درصد از کل میزان تولید محصولات زراعی کشور به‌عنوان یکی از قطب‌های کشاورزی کشور شناخته شده است و اگر چالش یا نقطه عطفی در این حوزه وجود داشته باشد بر راندمان تولید کشور تأثیر خواهد داشت، ازاین‌رو توجه به بخش کشاورزی و توسعه آن، در این استان می‌تواند مانع از بروز مهاجرت‌های روستایی و شکاف‌های منطقه‌ای شود و زمینه ساز رشد، ثبات و تداوم توسعه ملی گردد (Mullayi Hashjin and Mullaee Pardeh., 2014)؛ بنابراین این مطالعه با هدف مرور و بررسی وضعیت خاک‌های استان خوزستان و بیان مهم‌ترین چالش‌ها و محدودیت‌های منابع خاک پیش رو در استان که نوعی تهدیدی جهت تأمین امنیت غذایی می‌باشند تبیین شده است.

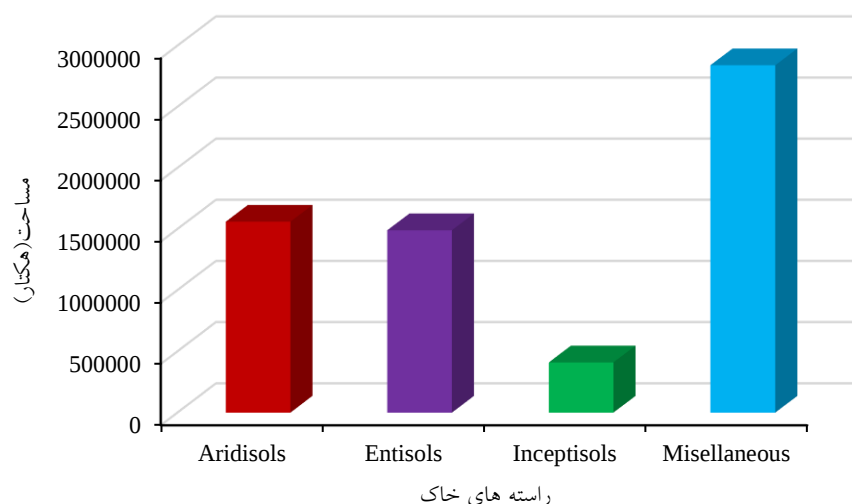
منطقه مورد مطالعه

استان خوزستان با مساحت حدود ۶۴۰۰۰ کیلومترمربع، از مناطق کوهستانی شمالی و شرقی با اقلیم خشک و نیمه‌خشک در جنوب غربی ایران است. شمال و شرق استان خوزستان را سلسله کوه‌های زاگرس محصور کرده است. از لحاظ پستی و بلندی استان را می‌توان به دو منطقه‌ی کوهستانی و جلگه‌ای تقسیم کرد، که منطقه‌ی کوهستانی عمدتاً در شمال و شرق استان است و حدود دو پنجم مساحت کل استان (بالغ بر ۲۵۶۰۰ کیلومترمربع) را شامل می‌شود. منطقه‌ی جلگه‌ای که شامل جنوب و جنوب

کردند. به‌طور کلی خاک‌های خوزستان جوان هستند و فعل و انفعالات زیادی روی آن‌ها انجام نشده است و تکامل خاک‌ها از پیشرفت قابل ملاحظه‌ای برخوردار نیست و مطابق با نقشه ارائه‌شده در شکل ۱ عمده رسته‌های خاک موجود در استان خوزستان به ترتیب فراوانی رسته ایدی سولز، انتی سولز و اینسپتی سولز می‌باشند (Taherzadeh et al., 2003). به‌طور کلی بررسی‌ها نشان می‌دهد که در بخش‌های جنوبی استان حداکثر تحول خاک به تشکیل افق سالیک مربوط می‌گردد و با حرکت به بخش‌های شمال استان (از شاور به سمت اندیمشک و ...)، با افزایش ارتفاع از سطح دریا و بهبود شرایط زهکشی، شوری اراضی نسبتاً کاهش می‌یابد و خاک دارای افق تکامل یافته تری با سولوم ضخیم‌تر است. این اراضی دارای اپی‌پدون اکریک و افق‌های کمبیک و گاه کلسیک می‌باشند؛ که بهبود شرایط زهکشی در این بخش از منطقه، سبب انتقال کربنات‌ها از سطح به عمق شده است (Jafari and Nadian, 2014).

از سطح خاک است (Jafari et al., 2010). به‌طوری‌که در خاک‌های اراضی با واحد فیزیوگرافی پست، به‌واسطه تبخیر شدید سطحی، خاک دارای تجمع شوری و افق سالیک است. در بخشی از اراضی با احداث سیستم زهکشی زیرزمینی، نمک‌ها از پروفیل خاک شسته شده است. در قسمت‌های میانی دشت، بسته به فاصله از رودخانه و شرایط ژئومورفولوژی خاک، برخی از خاک رخ‌ها دارای تجمع نسبتاً کمتری از شوری می‌باشند. در بخش‌های شمالی، انتقال ثانویه آهک نیز رخ داده است. بافت خاک از بخش‌های شمالی استان به سمت جنوب رو به سنگینی (بافت رسی، لومی رسی و ...) است. ذرات درشت در قسمت‌های شمالی‌تر و ذرات ریزتر در بخش‌های جنوبی‌تر رسوب‌گذاری شده‌اند. عبدالحی و همکاران (۲۰۱۰)، در بررسی مواد مادری تقریباً مشابه و عمدتاً آهکی خوزستان، پستی و بلندی را به‌عنوان عمده‌ترین فاکتور خاک‌سازی منطقه در ایجاد اختلاف میزان تکامل خاک و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی عنوان





شکل ۱- نقشه خاک استان خوزستان و فراوانی رسته‌های موجود در آن
Figure 1- Soil map of Khuzestan province and the abundance of its soil orders (Taherzadeh et al., 2003)

محدودیت‌های مختلف و عمدتاً شوری روبه‌رو است و تنها حدود ۱/۲ میلیون هکتار آن بدون محدودیت است (Momeni, 2011; Saadat et al., 2019).

از این‌رو، شوری خاک، یکی از محدودیت‌های غالب در خاک‌های کشور و به‌ویژه در استان خوزستان است و بالغ‌بر ۱۷ درصد از کل خاک‌های شور استان را خاک‌های شور و قلیا شامل می‌شود، هر چند که در فلات مرکزی نیز سهم خاک‌های شور و قلیا ۱۶/۵ درصد است (Qureshi, et al., 2007). مطابق با مطالعه Momeni (۲۰۱۱)، در مطالعات خاکشناسی و طبقه‌بندی اراضی، خاک‌های مناطق شور ایران بر اساس روش طبقه‌بندی جامع خاک‌ها (هیأت مطالعات خاکشناسی، ۱۹۹۸)، در رسته ارایدی سولز و در سطح زیر گروه غالباً جزو خاک‌های Gypsic Petrogypsic, Gypsic Haplosalids, Aquisalids Typic و Typic Aquisalids. Haplosalids طبقه‌بندی شده‌اند که غالب اراضی شور استان خوزستان در سطح زیر گروه جزء خاک‌های Typic Aquisalids, Haplosalids و Gypsic قرار می‌گیرند.

طی بررسی‌های صورت گرفته حاصل از بالغ‌بر ۱۱۰۰ نمونه خاک از سال ۱۳۹۰ از وضعیت خاک‌های استان

بررسی ویژگی‌های خاک استان خوزستان شوری

شوری خاک یکی از ویژگی‌های پویای خاک بوده که تحت تأثیر عوامل بسیاری قرار دارد (Litalien and Zeeb., 2020). مهم‌ترین عامل شوری ثانویه در خاک‌ها انسان است که با آبیاری با آب با کیفیت پایین باعث افزایش شوری خاک شده و متعاقب آن در اثر تبخیر شدید از سطح خاک، آب از خاک تبخیر شده و نمک‌ها در سطح خاک باقی می‌ماند (Darwish et al., 2005). در دهه‌های اخیر، فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه گسترش کشاورزی و آبیاری اراضی با آب شور آسیب‌های قابل توجهی به ساختار خاک وارد کرده و منجر به شورشدن آن شده است (Khasanov, et al., 2022). بخش بزرگی از اراضی کشاورزی ایران به‌علت قرار گرفتن در اقلیم خشک و نیمه خشک و مدیریت نامناسب زراعی و باغی در خطر شوری قرار گرفته‌اند و بر اساس مطالعات موجود سطحی حدود ۴۴/۵ میلیون هکتار را به خود اختصاص داده است (Banaei, 2002). بر اساس مطالعات و بررسی‌های انجام‌شده، سطح اراضی کشاورزی کشور حدود ۱۸/۵ میلیون هکتار است. که از این مقدار، حدود هشت میلیون هکتار به‌صورت آبی بوده که حدود ۶/۸ میلیون هکتار آن با

خوزستان، مشخص شد شوری ۳۷ درصد خاک‌های حوزه کشاورزی، بیشتر از چهار دسی‌زیمنس بر متر است که این میزان در سال ۱۴۰۰ به ۶۰ درصد رسیده یعنی ۲۳ درصد خاک‌های خوزستان بیشتر شور شده است (Jafarnejad and Meskini vishkaei, 2024). همچنین نتایج پهنه‌بندی شوری خاک‌های اراضی کشاورزی استان خوزستان نشان می‌دهد که در بخش‌های شمالی دشت خوزستان، شوری خاک عمدتاً کمتر از چهار دسی‌زیمنس در متر است و خاک‌های اراضی کشاورزی این مناطق مشکل شوری ندارند. اکثر اراضی کشاورزی در غرب و جنوب دشت خوزستان دارای شوری بالاتر از ۲۰ دسی‌زیمنس در متر بوده و این اراضی عمدتاً جزء خاک‌های شور و سدیمی می‌باشند (Jafarnejad et al., 2017).

یکی از دلایل عمده شوری خاک‌های خوزستان (به‌ویژه اراضی جنوبی و غرب استان) کیفیت آب‌های ورودی به مزارع است که بایستی شیوه کشت و آبیاری مدیریت شود؛ بنابراین وجود محدودیت شوری به‌طور جدی تولید محصولات کشاورزی، بهره‌وری خاک و کشاورزی پایدار را تهدید می‌کند و به‌عنوان یک خطر محیطی شدید محسوب می‌گردد (Shahrayini and Noroozi., 2022). وجود سفره آب زیرزمینی شور و کم‌عمق در منطقه یکی دیگر از دلایل عمده شور شدن اراضی است که بدلیل شرایط اقلیمی موجود از جمله تبخیر بالای منطقه و کمبود بارش، سبب تجمع املاح در لایه‌های سطحی خاک گردیده است. علاوه بر سطح بالا و شوری زیاد آب زیرزمینی عواملی چون مواد مادری، تأثیر کیفیت آب رودخانه‌ها، شرایط آب و هوایی منطقه، بافت و ساختمان خاک را از مهم‌ترین علل شوری خاک‌های منطقه می‌توان برشمرد. به‌طوری‌که سواری و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه خود گزارش کردند که تغییرات شوری خاک در استان خوزستان از شمال به جنوب افزایش می‌یابد و توزیع مکانی شوری نیز نشان داد که بیشترین میزان شوری در جنوب و غرب استان قرار دارد. اراضی دارای شوری بالا در واحدهای اراضی پست و دشت واقع شده است

که از لحاظ ارتفاعی نسبت به دیگر واحدها در ارتفاع پایین‌تری قرار دارند. در نتیجه بر اساس شیب موجود کلیه رواناب حاصله، املاح و مواد دانه‌ریز به این نواحی انتقال یافته و به‌دنبال آن در اثر تبخیر آب، املاح در سطح خاک باقی می‌مانند. همچنین بالا بودن سطح آب زیرزمینی و حرکت موئینگی باعث تجمع املاح در این خاک‌ها می‌شود. علاوه بر این نواحی جنوبی استان خوزستان به دلیل نزدیکی به خلیج فارس و همچنین نوع تشکیلات زمین‌شناسی و مواد مادری به‌طور طبیعی استعداد شوری دارند (Zaman et al. 2018). نزدیکی این اراضی به دریا موجب شده است که پدیده نفوذ آب‌شور دریا به سمت دشت اتفاق بیفتد. در واحدهای کوهستانی، تپه‌ها و دشت دامنه‌ای آبرفتی نواحی شمال و شرق استان به علت وجود رس کمتر و شن بیشتر در افق‌های سطحی خاک، شستشوی املاح بیشتر انجام‌شده و احتمالاً سبب تجمع آن‌ها در خاک زیرسطحی یا خروج آن‌ها از پروفیل خاک شده است. همچنین لازم به ذکر است که در استان خوزستان شور شدن خاک در اثر فعالیت‌های انسانی نیز به‌صورت یک مسئله جدی درآمده است (Jafari, 2020). به‌طوری‌که جعفری (۲۰۲۰)، در بررسی خود تغییر رژیم هیدرولوژی رودخانه‌ها و کاهش دبی آن در اثر سدسازی و کاهش نزولات آسمانی را از دلایل عمده شور شدن اراضی گزارش نموده است. بنابراین عملیات مختلف مانند مدیریت نادرست اراضی کشاورزی، عدم شستشوی نمک‌ها، بی‌توجهی به تناوب و انتخاب گیاه، عدم رعایت آیش و فاضلاب‌های شهری از جمله عواملی هستند که موجب افزایش شوری خاک می‌شوند. از طرفی کیفیت آب زیرزمینی و آب آبیاری اراضی کشاورزی نیز در افزایش شوری خاک‌ها نقش اساسی دارند. این مسئله بیشتر مناطق نیمه جنوبی استان را شامل می‌شود. به این دلیل که نواحی شمالی استان از نظر دما و نزولات جوی شرایط بهتری دارند که در نتیجه آن میزان آبیاری خاک بیشتر شده و به‌دلیل بیشتر بودن مواد آلی نیاز به کوددهی کاهش یافته است. لذا بر اساس مطالعات

انجام گرفته توسط سعادت و همکاران (۲۰۲۳) نیز این موضوع تأیید شده است که اراضی کشاورزی در نواحی شمالی نسبت به اراضی کشاورزی نواحی جنوبی از مقدار شوری کمتری برخوردارند؛ که علاوه بر تأثیر واحدهای شکل اراضی و عوامل انسانی در تجمع املاح، نوع کاربری اراضی نیز در تجمع املاح مؤثر است؛ بنابراین به منظور بهره‌برداری بهینه از خاک اراضی کشاورزی منطقه و با محوریت حفظ محیط‌زیست قبل از هر اقدامی، اصلاح اراضی و شستشوی نمک و سدیم زدایی لازم است انجام شود. نظر به اینکه ایجاد شوری عمدتاً معلول بالا بودن سطح آب زیرزمینی در منطقه است، لذا ضرورت احداث شبکه مصنوعی زهکشی زیرزمینی در منطقه برای اصلاح اراضی مشهود است.

pH خاک

در بسیاری از خاک‌های ایران به دلیل مقدار کربنات کلسیم زیاد و pH بالا، فرم قابل استفاده برخی از عناصر غذایی کمتر از مقدار لازم برای رشد مناسب گیاه است به همین دلیل حتی با وجود مصرف زیاد کود در اراضی کشاورزی به دلیل فراهم نبودن شرایط جذب عناصر توسط گیاه، عملکرد محصول پایین است (Norouzi et al., 2018)؛ بنابراین در خاک‌های استان خوزستان نیز بالا بودن pH یکی از چالش‌های مهم خاک است، pH خاک شاید مهم‌ترین ویژگی شیمیایی خاک باشد که منعکس‌کننده وضعیت کلی شیمیایی خاک بوده و بسیاری از فرایندهای شیمیایی و بیولوژیکی رخ داده در خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به همین دلیل دانستن مقدار آن مهم و ضروری است (Gholami, et al., 2021). لذا بررسی و پایش خاک‌های استان خوزستان در سال ۱۳۹۰ نشان داد که بیش‌ترین میزان pH در منطقه بهبهان با میانگین ۷/۷۴ و کمترین در منطقه شوشتر با میانگین ۷/۱۲ بدست آمد؛ و میانگین pH خاک‌های مورد مطالعه در استان خوزستان حدود ۷/۴ است که تقریباً بعد از ۱۰ سال (سال ۱۴۰۰) تغییری نکرده است، چرا که pH یک ویژگی است که به ظرفیت بافری

خاک مربوط می‌شود بنابراین نتیجه بدست آمده با توجه به خصوصیات خاک‌های استان و مطابق اصول علمی قابل انتظار بود. شهبازی و بشارتی (۲۰۱۳) نیز در مطالعه خود گزارش کردند که حدود ۸۳ درصد خاک‌های کشور دارای pH بین ۷/۵ تا ۸/۵ هستند. بطورکلی، غلظت عناصر در محلول خاک توسط تعادل بین فاز محلول و فاز جامد خاک کنترل می‌شود و پهاش نقش تعیین‌کننده‌ای در این تعادل دارد؛ و در دسترس بودن برخی از عناصر غذایی از جمله فسفر، آهن، روی، مس و منگنز در خاک‌های قلیایی بسیار کم است، اگرچه غلظت کل این عناصر ممکن است به نسبت زیاد باشد؛ بنابراین پهاش در قدرت خاک برای جذب و غیرفعال کردن عناصر سنگین نقش تعیین‌کننده‌ای به عهده دارد (Zare et al., 2017). لذا در مناطق خشک و نیمه‌خشک از جمله خوزستان، اضافه نمودن مواد آلی و ترکیبات تولیدکننده اسید و گوگرد عنصری برای کاهش pH، به خاک پیشنهاد می‌شود.

فرسایش خاک

هوازدگی و فرسایش طبیعی خاک امری قطعی و ناگزیر است، اما انسان با فعالیت‌های متنوع خود آن را کاهش یا افزایش می‌دهد (Rezaei, 2022). استان خوزستان به دلیل میزبانی از چندین رودخانه بزرگ کشور از جمله کارون، کرخه، دز و جراحی-زهره و همچنین حساسیت زیاد خاک‌های این مناطق به فرسایش از جایگاه خاصی در مطالعات فرسایش و مدیریت رسوب برخوردار است (Davoudi et al., 2024). به‌طوری‌که در قسمت‌های شمال خوزستان که بیشتر مناطق کوهستانی و دارای زمین‌های شیب‌دار است فرسایش آبی و در قسمت جنوبی نیز که بیشتر زمین‌ها به‌صورت دشت است فرسایش بادی غالب است. هر چند که امروزه در بخش‌های شمالی خوزستان یعنی بخش‌های کوهستانی، فرسایش آبی تشدید شده که دلیل جنگل تراشی، چرای بی‌رویه و از بین رفتن پوشش طبیعی و همچنین تاراج جنگل‌های بلوط و در نتیجه لخت شدن زمین و از بین رفتن حفاظ طبیعی آن است. فرسایش بادی هم در خوزستان تشدید شده است و دلیل

روش‌های غیر سازه‌ای نسبت به روش سازه‌ای (بانکت بندی، سدهای چپری و غیره) دخالت کمتری در طبیعت ایجاد می‌کنند و می‌توانند به نحو بهتری کمک کنند تا حوزه‌های آبخیز زودتر به تعادل اکولوژیک برسند (Saidian and Aghamirzadeh, 2022).

آهک (کربنات کلسیم) خاک

اکثر خاک‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک تحت تأثیر کربنات‌ها قرار دارند. این خاک‌ها به‌عنوان خاک‌های آهکی شناخته می‌شوند که حدود ۱۲ درصد خاک‌های سراسر جهان را به خود اختصاص داده‌اند (FAO, 1972) و از لحاظ فیزیکی و شیمیایی رفتاری متفاوت از خاک‌های غیرآهکی داشته و حاوی پنج درصد یا بیشتر کربن غیرآلی یا کربنات کلسیم معادل هستند (Soil Survey Staff, 1999). مطابق مطالعات صورت گرفته حدود ۶۵ درصد از خاک‌های ایران، به دلیل اقلیم و مواد مادری، آهکی هستند (FAO, 1972). شهبازی و بشارتی (۲۰۱۳) در مطالعه خود گزارش نمودند که خاک‌های ایران متأثر از کربنات کلسیم بوده و بیش از ۸۷ درصد خاک‌های اراضی کشاورزی بیشتر از پنج درصد کربنات کلسیم معادل دارند. حضور کربنات‌های کلسیم در خاک به‌واسطه تأثیر بر pH و قدرت تامپونی آن، توزیع اندازه‌ای ذرات، ساختمان خاک، ظرفیت نگهداشت آب و جریان آب در خاک، خصوصیات خاک‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Keshavarzi, et al., 2011). کانی‌های کربناته ممکن است به‌صورت اولیه از مواد مادری غنی از کربنات نشأت گرفته و یا به‌صورت پدوژنیکی (ثانویه)، از رسوب مجدد کربنات‌های ثانویه شکل بگیرند، از این رو، کلسیت از رایج‌ترین کانی کربناته در خاک است و می‌تواند به‌صورت پدوژنیک و یا به ارث رسیده از مواد مادری آهکی باشد. کربنات‌ها در خاک‌های خوزستان اغلب به‌صورت اولیه بوده و به‌دلیل اقلیم فراخشک و خاک جوان به‌میزان خیلی کمی آبشویی شده‌اند (Jafari, 2013)؛ بنابراین یکی دیگر از چالش‌های مهم خاک‌های کشاورزی خوزستان وضعیت آهکی آن‌ها است که طبق مطالعه

آن ساخت سدهای متعدد بر رودخانه‌های این استان است. به‌طوری‌که با تغییر رژیم هیدرولوژی رودخانه‌ها و کاهش دبی آن در اثر سدسازی و کاهش نزولات آسمانی، از یک‌سو کیفیت آب در طی یک دوره ۲۵ ساله به‌شدت کاهش‌یافته و میزان املاح به بیش از دو برابر افزایش‌یافته است. از سوی دیگر در اثر ممانعت از جریان سیلابی دشت، شوری شدید خاک‌ها را سبب شده به‌طوری‌که از حد تحمل گیاهان شور دوست بومی نیز فراتر رفته است. در اثر این پدیده، گیاهان سطحی از بین رفته و خاک لخت شده است؛ بنابراین بشر با دست‌کاری رژیم هیدرولوژی رودخانه سبب شده است که علاوه بر تخریب ساختار طبیعی یک زیست‌بوم پایدار، بخشی از مشکلات فعلی کیفی هوا نیز پدید آید که برای رفع آن باید در تصمیمات مربوط به سدسازی و تغییرات رژیم هیدرولوژی تجدیدنظر اساسی صورت گیرد (Jafari, 2020). از طرفی حدود نه درصد از مساحت دشت خوزستان، معادل ۳۴۹۲۵۴ هکتار مستعد تولید گرد و غبار است که سبب کاهش عملکرد محصولات کشاورزی و همچنین ضرر اقتصادی در منطقه شده است (Heidarian et al., 2017)؛ بنابراین فرسایش خاک از عوامل تأثیرگذار بر تخریب اراضی است که پیامدهایی همچون کاهش حاصلخیزی و بهره‌وری خاک، از دست دادن تنوع زیستی جانداران، تشدید لغزش و رانش زمین، رسوب‌گذاری در دریاها، دریاچه‌ها، مخازن سدها و کاهش کیفیت آب را به همراه دارد و از موانع اصلی دستیابی به توسعه پایدار کشاورزی و منابع طبیعی است (Arabameri et al., 2018)؛ بنابراین برای مبارزه و به‌تبع آن موفقیت در مهار فرسایش خاک ضرورت دارد اقدام به شناخت و آگاهی از روش‌های مختلف سنتی و نوین حفاظت از خاک در سراسر دنیا شود (Noroozi and Shoaee, 2018)؛ که در این راستا توصیه می‌شود تا آنجایی که امکان دارد از روش‌های غیر سازه‌ای (مدیریت کشت (روش کشت، تناوب و غیره)، افزودن مواد آلی به خاک، استفاده از سامانه‌های نوین آبیاری، استفاده از مالچ‌های آلی یا مصنوعی، احیای تالاب‌ها و غیره) استفاده شود چون

وضعیت حاصلخیزی خاک‌های استان خوزستان (با دیدگاه

خاک‌های کشاورزی در سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰)

تولید محصولات کشاورزی متأثر از عوامل متعددی نظیر نوع محصول، رقم گیاه، مدیریت آب، دفع آفات و بیماری‌های گیاهی و همچنین حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاهی است. در میان این عوامل حاصلخیزی خاک به معنی توان خاک برای تأمین عناصر غذایی به مقدار کافی و در توازن مطلوب برای رشد گیاه از جمله مهم‌ترین عوامل در دستیابی به امنیت غذایی و کشاورزی پایدار است (Khavazi, 2014). آن چه که اهمیت حاصلخیزی را دو چندان می‌کند نیاز به تولید غذای بیشتر برای جمعیت در حال افزایش است که مناسب‌ترین روش برای تحقق این موضوع افزایش تولید در واحد سطح است. تولید غذای بیشتر و سایر منابع محیطی با حفظ منابع زیستی برای آیندگان تنها در سایه بهینه‌سازی بهره‌برداری از خاک امکانپذیر است (Seyedmohammadi et al., 2016)؛ بنابراین، مدیریت مناسب حاصلخیزی خاک از مهم‌ترین اساسی‌ترین راهکارهای افزایش کیفیت محصولات کشاورزی و ارتقای سطح سلامت جامعه است (Saadinejad et al., 2013)؛ و تولید پایدار کشاورزی از طریق مدیریت بهبود خاک برای تأمین امنیت غذایی و کاهش فقر بسیاری ضروری است؛ بنابراین طی این مطالعه صورت گرفته در اراضی کشاورزی خوزستان در دامنه سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ (در یک دوره ده‌ساله)، نتایج به شرح ذیل به دست آمد:

کربن آلی

در مطالعه صورت گرفته در خاک‌های استان خوزستان، میزان کربن آلی در عمق زراعی (۳۰-۰ سانتیمتر)، از حداکثر ۱/۹۶ درصد تا حداقل ۰/۰۴ درصد متغیر بوده و میانگین آن به میزان ۰/۶ درصد است؛ بنابراین میزان کربن آلی خاک‌های مناطق مختلف استان خوزستان بیانگر سه گروه خاک از این نظر می‌باشند: گروه اول (کمتر از ۰/۷ درصد): بیشتر در مناطق غربی، جنوبی و مرکزی

صورت گرفته با برداشت حدود بالغ بر ۱۱۰۰ نمونه برداشت‌شده از اراضی کشاورزی، بیشترین میانگین میزان آهک در خاک‌های مناطق هندیجان (بیشتر از ۵۰ درصد) و کمترین میزان میانگین آن (۳۶/۱۵ درصد) در خاک‌های دشت آزادگان مشاهده شد و میانگین میزان آهک در خاک‌های خوزستان ۴۶/۳ درصد به دست آمد (Jafarnejad, Besharati and Meskini vishkaei, 2024). (۲۰۱۳) نیز در بررسی‌های خود گزارش نمودند که ۷۶ درصد خاک‌های استان دارای کربنات کلسیم بین ۴۰ تا ۶۰ درصد هستند که هر چند عدد به‌دست‌آمده در این تحقیق در این بازه قرار دارد ولی شاید با برداشت تعداد نمونه بیشتر و در بازه زمانی طولانی‌تر بتوان به واقعیت گزارش‌شده توسط همکاران نزدیک‌تر شد؛ بنابراین با توجه به اینکه این آهک به‌صورت آهک اولیه است که از ذرات بسیار ریز تشکیل شده و با خاک مخلوط است تأثیر منفی بر وضعیت حاصلخیزی خاک‌ها گذاشته و کاهش حلالیت و در نتیجه جذب عناصر غذایی و به‌ویژه عناصر کم‌مصرف مانند آهن و روی را برای گیاه در بر دارد. حلالیت آهک در خاک اغلب کم بوده و از لحاظ املاح کل عصاره اشباع خاک اثری بر شوری خاک ندارد؛ بنابراین تنها راه اصلاح این اراضی استفاده از کودهای حیوانی و بقایای گیاهی در سطح خاک است که ریشه گیاه با آن تماس دارد. همچنین برای رفع نیازهای غذایی گیاهان لازم است که کودهای کلات شده با لیگاندهایی مانند EDTA و EDDHA که پایداری بالایی در pH های بالای ۷ دارند، استفاده نمود. همچنین توصیه می‌شود که کشاورزان در مراحل رشد از کودهای با خاصیت اسیدی مانند استفاده از سولفات آمونیوم و یا اوره فسفات به‌منظور تأمین بخشی از نیتروژن مورد نیاز استفاده کنند. همچنین اخیراً ترکیبات اسیدی که دارای pH کمتر از یک است نیز در صنعت کود رایج شده است که استفاده از این ترکیبات می‌تواند ضمن بهبود جذب عناصر، اثرات منفی کربنات کلسیم را نیز کاهش می‌دهد (Jafarnejad et al, 2024).

استان شامل اهواز، دشت آزادگان، شادگان، خرمشهر و آبادان، امیدیه، رامشیر.

گروه دوم (بین ۰/۷ تا ۰/۹ درصد): مناطق شمالی شامل دزفول، شوش، شوشتر، اندیمشک، گتوند، مسجدسلیمان.

گروه سوم (۰/۹ درصد و بالاتر): مناطق شرقی شامل ایذه، باغ‌ملک، رامهرمز و بهبهان را شامل شد.

بر اساس مطالعات مشیری و همکاران، (۲۰۱۷)، درصد فراوانی اراضی کشاورزی در استان‌های مختلف با مقادیر کربن آلی کمتر از یک درصد را مورد بررسی قرار داده بودند در خاک‌های خوزستان حدود ۸۳/۳ درصد از اراضی کشاورزی کمتر از یک درصد گزارش شد؛ بنابراین بر اساس مطالعات مذکور در برخی شهرستان‌های استان در سال ۱۳۹۰، ۲۰ درصد خاک‌های خوزستان دارای کربن آلی کمتر از ۰/۵ درصد بودند در صورتی که در سال ۱۴۰۰ به ۲۵ درصد رسیدند، به عبارتی میزان کربن آلی در ۷۸ درصد از خاک‌های مورد مطالعه کمتر از یک درصد بود در صورتی که در سال ۱۴۰۰ به ۹۰ درصد تغییر کرد (شکل ۲ الف)) که یک زنگ خطر محسوب می‌شود چون با کاهش کربن آلی در خاک، جمعیت میکروبی نیز کم شده و در این حالت تجزیه و تبدیل کودهای مصرفی از جمله اوره به خوبی صورت نمی‌گیرد؛ بنابراین وضعیت کربن آلی در استان خوزستان مطلوب نیست و با افزایش میزان کربن آلی به میزان ۱ درصد در خاک‌ها، طبق مطالعات انجام شده ۳۰۰ کیلوگرم بر عملکرد گندم افزوده می‌شود (keshavarz et al., 2013). خاک‌ورزی شدید، عدم استفاده از کودهای سبز و کودهای آلی، وجود درجه حرارت بالا و اکسیداسیون سریع این مواد، سوزاندن کاه و کلش بقایای محصولات کشاورزی از مهم‌ترین دلایل کمبود ماده آلی در خاک‌های استان خوزستان است؛ بنابراین برای حفظ و یا افزایش کربن آلی در خاک راهکارهای مختلفی از جمله اعمال روش‌های مناسب خاک‌ورزی، مدیریت بقایای گیاهی، رعایت تناوب زراعی صحیح و کاربرد کودها و مواد آلی در خاک به‌تنهایی یا توأمان می‌بایست به کار گرفته شود. شیوه مدیریت زراعی

شامل عملیات خاک‌ورزی، کوددهی، آبیاری و تناوب زراعی بر میزان کربن آلی خاک تأثیرگذار است (Moshiri et al., 2021).

فسفر

غلظت فسفر قابل جذب در سال ۱۴۰۰ در عمق زراعی (۰-۳۰ سانتیمتر) در دامنه ۱/۲۲ تا ۲۸ میلی‌گرم در کیلوگرم متغیر بوده و میانگین آن به میزان ۷/۸۹ میلی‌گرم در کیلوگرم بود که نسبت مقادیر اندازه‌گیری شده در سال ۱۳۹۰ که میانگین فسفر ۸/۳۴ بود سیر نزولی داشته است (شکل ۲ ب)). همچنین بر اساس نتایج موجود (سال ۱۴۰۰) حدود ۳۰ درصد خاک‌ها دارای کمتر از ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم، ۴۵ درصد بین ۵ تا ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و ۱۵ درصد بین ۱۰ تا ۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک فسفر بود. بر همین اساس، میزان فسفر در سال ۱۴۰۰ در حدود ۹۰ درصد خاک‌ها و در سال ۱۳۹۰ در حدود ۸۵ درصد خاک‌ها کمتر از حد بحرانی (۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بودند (شکل ۲ الف)).

لذا بر اساس نتایج تجزیه خاک مقدار فسفر در مناطق مختلف جغرافیایی استان خوزستان به شرح زیر بود:

۱) مناطق شمالی استان

۳) مناطق غربی و جنوبی

میانگین فسفر قابل جذب در خاک‌های دشت آزادگان هشت و در مناطق شادگان، ماهشهر، خرمشهر و هندیجان بین چهار تا شش میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر بود.

۴) مناطق شرقی

میانگین فسفر قابل جذب در خاک‌های ایذه ۱۲ و در مناطق باغ‌ملک و رامهرمز بین ۸ تا ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر بود.

پتاسیم

غلظت پتاسیم قابل جذب خاک در عمق زراعی (۰-۳۰ سانتیمتر) در خاک‌های استان در سال ۱۴۰۰ در دامنه ۷۰ تا ۳۷۳ با میانگین ۱۶۹ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک بودند. به‌طوری که ۳۰ از خاک‌ها کمتر از ۱۵۰ میلی‌گرم پتاسیم در

آهن

غلظت آهن قابل جذب خاک در عمق ۳۰-۰ سانتیمتری در خاک‌های مورد مطالعه (سال ۱۴۰۰) در دامنه ۰/۵ تا ۴۱/۴ و میانگین ۷/۱ میلی گرم در کیلوگرم خاک قرار داشت که نسبت با سال ۱۳۹۰ با میانگین ۱۱ میلی گرم در کیلوگرم دارای روند کاهشی بود (شکل ۲(ب)). به طوری که حدود ۵۰ درصد خاک‌های استان دارای کمتر از پنج میلی گرم آهن در کیلوگرم خاک، ۲۰ درصد خاک‌ها بین ۵ تا ۷/۵ میلی گرم آهن در کیلوگرم و ۱۰ درصد خاک‌ها بین ۷/۵ تا ۱۰ میلی گرم آهن در کیلوگرم خاک بودند به عبارت دیگر حدود ۸۰ درصد خاک‌ها کمتر از ۱۰ میلی گرم آهن در کیلوگرم خاک داشتند. داده‌های اندازه‌گیری شده در سال ۱۳۹۰ (در دامنه ۱/۶ تا ۵۶ میلی گرم در کیلوگرم) دارای میانگین ۱۱ میلی گرم در کیلوگرم بودند و حدود ۳۰ درصد خاک‌های استان کمتر از پنج میلی گرم آهن در کیلوگرم، ۱۰ درصد خاک‌ها بین ۵ تا ۷/۵ میلی گرم آهن در کیلوگرم، ۱۴ درصد خاک‌ها بین ۷/۵ تا ۱۰ میلی گرم آهن در کیلوگرم و ۴۶ درصد بیش از ۱۰ میلی گرم در کیلوگرم آهن بودند و حدود ۵۴ درصد خاک‌ها کمتر از ۱۰ میلی گرم آهن در کیلوگرم خاک داشتند (شکل ۲(الف)) و بیشترین میانگین آهن خاک در منطقه دشت آزادگان با میانگین ۲۳/۰۵ میلی گرم در کیلوگرم و کمترین در منطقه اندیمشک با میانگین ۵/۸۵ میلی گرم در کیلوگرم به دست آمد؛ و نهایتاً بر اساس نتایج حاصله میزان آهن قابل جذب در مناطق مختلف استان به صورت زیر به دست آمد:

مناطق شمالی

خاک‌های منطقه شوشتر دارای میانگین غلظت آهن ۱۵، دزفول و شوش دارای میانگین ۹/۵ و اندیمشک دارای میانگین ۴/۵ میلی گرم بر کیلوگرم بود.

مناطق مرکزی و جنوبی

میانگین غلظت آهن در خاک‌های منطقه اهواز به میزان ۱۰ و هندیجان، رامشیر و ماهشهر دارای دامنه غلظتی میانگین ۹ تا ۱۱ میلی گرم بر کیلوگرم بود.

کیلوگرم خاک و ۵۰ درصد خاک‌های بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ میلی گرم در کیلوگرم داشتند و به عبارت دیگر حدود ۸۰ درصد خاک‌های استان کمتر از ۲۰۰ میلی گرم پتاسیم در کیلوگرم خاک داشتند؛ که مقادیر اندازه‌گیری شده در سال ۱۴۰۰ در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده در سال ۱۳۹۰ (میانگین ۱۷۱ میلی گرم در کیلوگرم) روند کاهشی داشت (شکل ۲(ب)). در سال ۱۳۹۰ حدود ۷۰ درصد خاک‌های استان کمتر از ۲۰۰ میلی گرم پتاسیم در کیلوگرم خاک داشتند و بیشترین میانگین پتاسیم قابل دسترس خاک در منطقه شوش با میانگین ۲۱۳/۷۲ میلی گرم در کیلوگرم و کمترین در منطقه اندیمشک با میانگین ۱۴۹/۷ میلی گرم در کیلوگرم به دست آمد (گزارش سیمای حاصلخیزی استان خوزستان (Jafarnejad and Meskini vishkaei, 2024)). بر اساس نتایج حاصله میزان پتاسیم قابل جذب در مناطق مختلف استان به صورت زیر به دست آمد:

مناطق شمالی استان

در مناطق شوشتر، لالی، گتوند و شوش بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک متغیر بود و در سایر مناطق نظیر دزفول و اندیمشک دارای میانگین ۱۰۰ تا ۱۵۰ کیلوگرم بر کیلوگرم است.

مناطق مرکزی و جنوبی استان

در مناطق اهواز، هندیجان و رامشیر دارای میانگین ۱۵۰ و امیدیه دارای میانگین ۱۱۵ میلی گرم پتاسیم در کیلوگرم خاک بود.

مناطق غربی استان

میانگین پتاسیم قابل جذب در مناطق دشت آزادگان و شادگان حدود ۱۵۰ میلی گرم در کیلوگرم و خرمشهر دارای ۲۲۰ میلی گرم در کیلوگرم بود.

مناطق شرقی استان

میانگین پتاسیم قابل جذب در منطقه ایذه حدود ۲۷۰ میلی گرم در کیلوگرم و بهبهان دارای میانگین ۱۹۰ میلی گرم در کیلوگرم، رامهرمز و باغ‌ملک ۱۵۰ میلی گرم در کیلوگرم و امیدیه دارای میانگین ۱۱۳ میلی گرم بر کیلوگرم بود.

مناطق غربی

دشت آزادگان و شادگان با میانگین ۱۷ میلی گرم بر کیلوگرم و خرمشهر دارای میانگین ۲۰ میلی گرم آهن در کیلوگرم خاک بود.

مناطق شرقی

ایذه دارای میانگین ۸/۵ و بهبهان با میانگین ۷/۴ میلی گرم در کیلوگرم، رامهرمز ۹/۵ و باغ‌ملک ۱۶ میلی گرم در کیلوگرم، امیدیه دارای میانگین چهار میلی گرم آهن بر کیلوگرم خاک بودند.

روی

میزان روی خاک‌های مورد مطالعه در استان در سال ۱۴۰۰ در دامنه ۰/۰۳ تا ۳/۷ با میانگین ۰/۶۹ میلی گرم روی در کیلوگرم خاک قرار داشت و نسبت به سال ۱۳۹۰ (میانگین ۰/۸۸ میلی گرم در کیلوگرم) دارای روند کاهشی بود (شکل ۲). حدود ۲۵ درصد خاک‌ها دارای کمتر از ۰/۲۵ میلی گرم روی در کیلوگرم خاک، ۲۵ درصد خاک‌ها بین ۰/۲۵ تا ۰/۵ میلی گرم روی در کیلوگرم خاک، ۲۵ درصد خاک‌ها بین ۰/۵ تا یک میلی گرم روی در کیلوگرم خاک بودند، به عبارت دیگر حدود ۷۵ درصد خاک‌های مورد مطالعه کمتر از ۱ میلی گرم روی در کیلوگرم خاک داشتند غلظت روی قابل جذب در خاک‌های استان در عمق ۳۰-۰ سانتیمتری در سال ۱۳۹۰ در دامنه ۰/۰۹ تا ۴/۶۲ و میانگین ۰/۸۸ میلی گرم در کیلوگرم متغیر بود؛ و همچنین نتایج حاکی از آن بود که ۷۶ درصد نمونه‌ها دارای مقادیر روی کمتر از ۱ میلی گرم در کیلوگرم بودند (شکل ۲)؛ و با توجه به نتایج به دست آمده از میزان روی قابل جذب در مناطق مختلف استان به شرح زیر به دست آمد:

مناطق شمالی

خاک‌های منطقه شوشتر، دزفول، شوش و اندیمشک دارای میانگین غلظت روی ۱-۱/۱، منطقه گتوند و لالی دارای میانگین غلظتی ۰/۷۴ میلی گرم بر کیلوگرم بود.

مناطق مرکزی و جنوبی

میانگین غلظت روی در خاک‌های منطقه اهواز، هندیجان، رامشیر و ماهشهر به میزان ۰/۷۴ میلی گرم بر کیلوگرم بود.

مناطق غربی

دشت آزادگان، شادگان و خرمشهر با میانگین ۰/۵ تا ۰/۸ میلی گرم روی در کیلوگرم خاک بود.

مناطق شرقی

ایذه و امیدیه دارای میانگین ۱/۳ و بهبهان و باغ‌ملک با میانگین ۰/۷ میلی گرم در کیلوگرم، رامهرمز یک میلی گرم روی بر کیلوگرم خاک بودند.

منگنز

غلظت منگنز قابل جذب در خاک‌های مورد بررسی استان در عمق ۳۰-۰ سانتیمتری در سال ۱۴۰۰ در دامنه ۰/۵ تا ۴۱/۴ با میانگین ۵/۵ میلی گرم در کیلوگرم خاک قرار داشت که این مقدار نسبت به میانگین به دست آمده در خاک‌های مورد بررسی در سال ۱۳۹۰ (میانگین ۶/۲ میلی گرم در کیلوگرم) کاهش یافته بود (شکل ۲). به طوری که بر اساس نتایج به دست آمده در سال ۱۴۰۰، حدود ۵۰ درصد خاک‌های استان دارای کمتر از پنج میلی گرم منگنز در کیلوگرم خاک، ۲۰ درصد خاک‌ها بین ۵ تا ۷/۵ میلی گرم منگنز در کیلوگرم و ۱۰ درصد خاک‌ها بین ۷/۵ تا ۱۰ میلی گرم منگنز در کیلوگرم بودند و نهایتاً حدود ۸۰ درصد خاک‌ها کمتر از ۱۰ میلی گرم منگنز در کیلوگرم خاک داشتند. از حداکثر ۲۶ تا حداقل ۲/۲ و میانگین ۶/۲ میلی گرم در کیلوگرم متغیر بود؛ و همچنین نتایج حاکی از آن بود که ۴۲ درصد خاک‌های مورد بررسی استان در سال ۱۳۹۰ کمتر از ۵ میلی گرم منگنز بر کیلوگرم، ۳۵ درصد خاک‌ها بین ۵ تا ۷/۵ میلی گرم منگنز بر کیلوگرم، ۱۳ درصد خاک‌ها بین ۷/۵ تا ۱۰ میلی گرم منگنز بر کیلوگرم و ۱۰ درصد خاک‌ها دارای منگنز بیش از ۱۰ میلی گرم در کیلوگرم بودند و در نهایت حدود ۹۰ درصد خاک‌ها کمتر از ۱۰ میلی گرم منگنز بر کیلوگرم خاک می‌باشند و مطابق بررسی‌های انجام شده بیشترین میانگین منگنز خاک در منطقه ایذه با میانگین

مس داشتند (شکل ۲)؛ و نهایتاً وضعیت نقاط مختلف استان از لحاظ مس قابل جذب به شرح زیر بود:

مناطق شمالی

خاک‌های منطقه شوشتر، دزفول، شوش و اندیمشک دارای میانگین غلظت مس $1/9 - 1/4$ ، منطقه گتوند و لالی دارای میانگین غلظتی $0/9$ تا $0/7$ میلی گرم مس بر کیلوگرم خاک بود.

مناطق مرکزی و جنوبی

میانگین غلظت مس در خاک‌های منطقه اهواز، هندیجان، رامشیر و ماهشهر به میزان $0/9 - 1/4$ میلی گرم بر کیلوگرم بود.

مناطق غربی

دشت آزادگان، شادگان و خرمشهر با میانگین $2/3 - 1/5$ میلی گرم مس در کیلوگرم خاک بود.

مناطق شرقی

میانگین غلظت مس (میلی گرم در کیلوگرم خاک) در خاک‌های ایزه دارای میانگین $1/4$ و بهبهان، باغ‌ملک و رامهرمز با میانگین $1/2$ میلی گرم در کیلوگرم و امیدیه $0/9$ بودند.

بنابراین به‌طور کلی بررسی نشان داد (شکل ۲) که در طی بازه ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰، شوری خاک اراضی استان خوزستان افزایش یافته درحالی که پتاسیم، آهن و عناصر ریزمغذی خاک عمده‌تاً کاهش یافته‌اند، با وجود اقدامات صورت گرفته جهت فرهنگ‌سازی مدیریت بهینه منابع خاک، وضعیت خاکی برای تولید و بهره‌برداری، کماکان نامطلوب است که بیانگر مدیریت نامناسب استفاده از خاک به‌ویژه توسط بهره‌بردار است. هر چند که رعایت نکردن برنامه محوری یکی دیگر از محدودیت‌های موجود کشاورزی استان است که از سال ۱۳۹۳ تلاش شده است تا برنامه محوری مصرف کود در خوزستان نهادینه شود تا کشاورز بداند که گیاه در چه مرحله‌ای است و به چه کودی و به چه میزان نیاز دارد، با توجه به اینکه خوزستان یکی از استان‌های پیشرو در این زمینه محسوب می‌شود و تمام

$10/55$ میلی گرم در کیلوگرم و کمترین در منطقه هندیجان با میانگین $4/06$ میلی گرم در کیلوگرم به دست آمد؛ و وضعیت کلی منگنز قابل جذب در نقاط مختلف استان به شرح زیر بود:

مناطق شمالی

خاک‌های منطقه شوشتر، دزفول، شوش و اندیمشک دارای میانگین غلظت منگنز $6 - 7$ ، منطقه گتوند و لالی دارای میانگین غلظتی 10 میلی گرم بر کیلوگرم بود.

مناطق مرکزی و جنوبی

میانگین غلظت منگنز در خاک‌های منطقه اهواز، هندیجان، رامشیر و ماهشهر به میزان $4 - 6$ میلی گرم بر کیلوگرم بود.

مناطق غربی

دشت آزادگان، شادگان و خرمشهر با میانگین $4 - 5$ میلی گرم منگنز در کیلوگرم خاک بود.

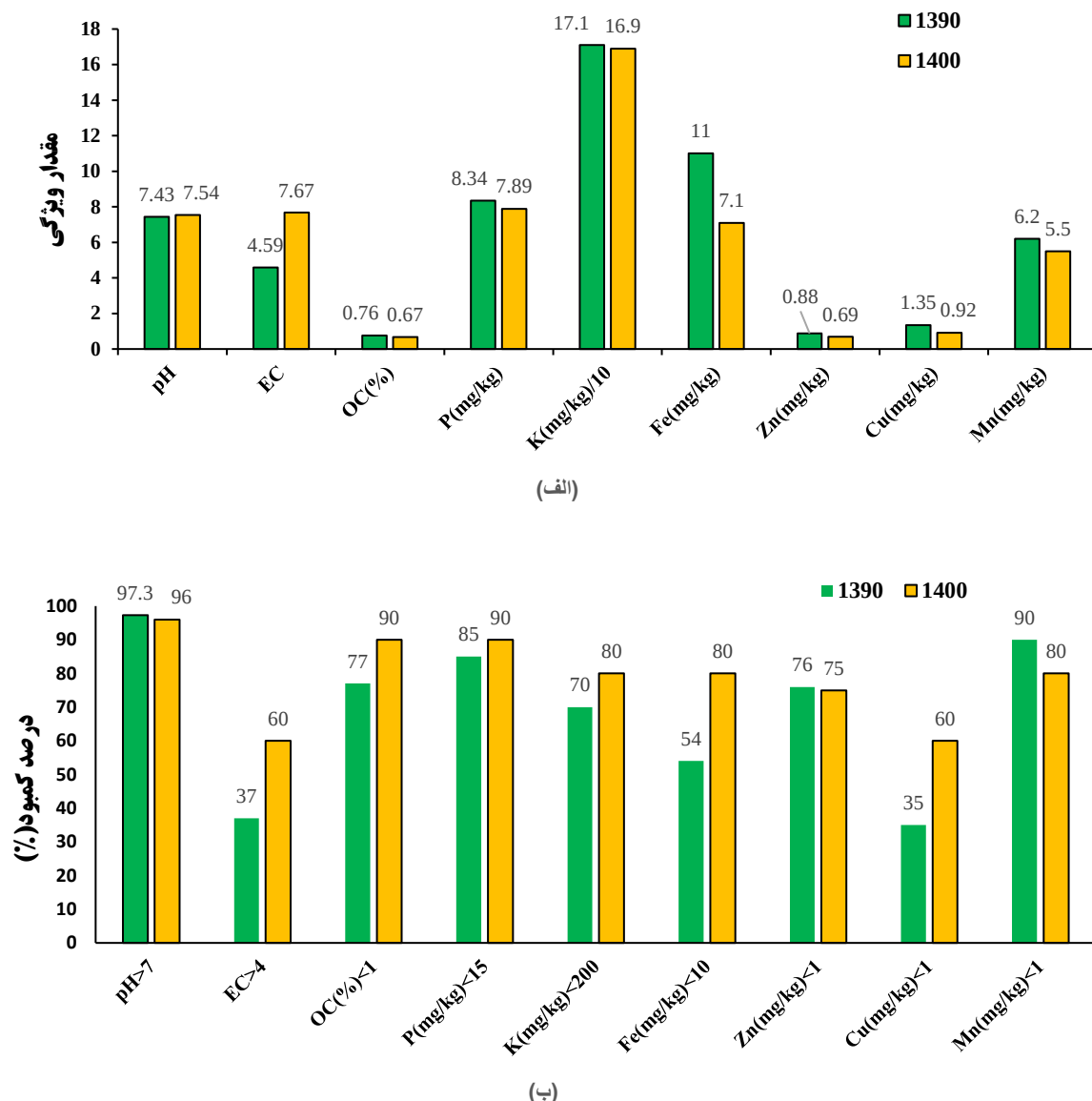
مناطق شرقی

ایزه دارای میانگین 12 و بهبهان و باغ‌ملک با میانگین $6 - 7$ میلی گرم در کیلوگرم، رامهرمز و امیدیه $4 - 5$ میلی گرم منگنز بر کیلوگرم خاک بودند.

مس

غلظت مس قابل جذب در خاک‌های مورد بررسی استان در عمق $30 - 0$ سانتیمتری در دامنه $0/04$ تا $5/1$ با میانگین $0/92$ میلی گرم مس در کیلوگرم خاک قرار داشت و مطابق با سایر عناصر کم‌مصرف نسبت به سال ۱۳۹۰ دارای روند کاهشی بود (شکل ۲). حدود 20 درصد خاک‌ها دارای کمتر از $0/3$ میلی گرم مس در کیلوگرم خاک، 40 درصد خاک‌ها بین $0/3$ تا 1 میلی گرم مس در کیلوگرم خاک بودند، به عبارت دیگر حدود 60 درصد خاک‌های مورد مطالعه کمتر از یک میلی گرم مس در کیلوگرم خاک داشتند. مقادیر مس قابل جذب در سال ۱۳۹۰ در دامنه $0/3$ تا حداقل $3/8$ و میانگین $1/35$ میلی گرم در کیلوگرم متغیر بود؛ و همچنین نتایج حاکی از آن بود که 35 درصد نمونه‌ها دارای مقادیر روی کمتر از یک میلی گرم در کیلوگرم بودند و مابقی نمونه‌های خاک بیش از یک میلی گرم در کیلوگرم،

برنامه‌های غذایی در اختیار کشاورزان خوزستانی قرار گرفته است.



شکل ۲- بررسی تغییرات میانگین (الف) و وضعیت برخی ویژگی‌های خاک در مزارع تحت کشت استان خوزستان بر اساس حد بحرانی (ب) در مزارع تحت کشت استان خوزستان در بازه زمانی ده‌ساله (۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰)

Figure 3- Examining the average changes (a) and the condition of some soil characteristics in the cultivated fields of Khuzestan province based on the critical level (b) in the cultivated fields of Khuzestan province in a ten-year period (1390 to 1400)

مصرف کودهای شیمیایی

میانگین مصرف کود در اراضی آبی استان خوزستان از حدود ۱۱۸ کیلوگرم در هکتار است. با توجه به اینکه میانگین مصرف کود در دنیا حدود ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار است در حال حاضر مقدار کود مصرفی در استان در مقایسه با میانگین جهانی بسیار کمتر است. از طرفی

مصرف متعادل کود یکی از عوامل مهم در افزایش عملکرد و بهبود کیفیت محصولات کشاورزی است. این در حالی است که به‌طور میانگین ۹۱ درصد کود مصرفی این استان را کودهای نیتروژنی، شش درصد آن را کود فسفاتی و تنها نزدیک به ۳ درصد آن را کودهای پتاسیمی تشکیل می‌دهد. این مقدار در جهان به‌طور میانگین ۵۶ درصد، ۲۴ درصد و

۲۰ درصد به ترتیب برای نیتروژن، فسفر و پتاسیم گزارش شده است (Jafarnejad and Meskini vishkaei, 2024).

بنابراین با توجه با مطالب ذکر شده در رابطه با مصرف کود در استان با چالش‌هایی مواجه هستیم که برخی از مهم‌ترین این چالش‌ها عبارت‌اند: - توجه مقدار مصرف نسبت به قبل کاهش قابل توجهی داشته است؛ - مصرف کودها نامتعادل است به‌طوری‌که استفاده از برخی کودها مانند کودهای ازته و غیره، زیاد و مصرف کودهای ریزمغذی‌ها اندک است؛ - عدم توجه مدیران و بهره‌برداران عرصه کشاورزی به مصرف کودهای بیولوژیک و به‌ساز-های خاک نظیر کودهای آلی مایع در برنامه تغذیه‌ای گیاه با توجه به فقر شدید کربن آلی، به‌طوری‌که در خاک‌های استان بار حاصلخیز نمودن خاک‌های کشاورزی و تغذیه گیاه بر دوش کودهای شیمیایی است و مصرف ماده آلی و شیوه تهیه آن، در برنامه‌های کشاورزی وجود ندارد و یا عملاً کم‌رنگ است و - عدم توسعه مصرف کود بر اساس مدیریت تلفیقی حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه. - عدم وجود شناسنامه خاک و عدم توصیه کودی بر اساس آزمون خاک یا به عبارتی عدم توجه بهره‌برداران به توصیه‌های صورت گرفته توسط محققان و کارشناسان، - عدم توسعه و حمایت از آزمایشگاه‌های خصوصی آب‌و خاک و گیاه. - عدم رعایت اصول چهارگانه کود (منبع مناسب، مقدار مناسب، زمان مناسب و جایگذاری) مشاهده می‌شود؛ بنابراین مصرف صحیح کود هنگامی خواهد بود که مقدار مناسب کود (چه مقدار کود؟) از منبع مناسب (از چه منبع کودی؟) و به شیوه مناسب (به چه روشی؟) و در زمان مناسب (در چه مرحله رشدی؟) بکار برده شود. نادیده گرفتن هریک از این موارد منجر به کاهش و یا عدم اثربخشی کود خواهد شد و سبب کاهش راندمان این کودها می‌شود. در حال حاضر دستورالعمل توصیه مقدار کود مورد نیاز محصولات زراعی مهم بر اساس تجزیه خاک (مقدار عنصر غذایی قابل استفاده)، عملکرد مورد انتظار و اقلیم توسط موسسه تحقیقات خاک و آب تهیه شده و به‌صورت

نشریات فنی در دسترس قرار دارد. با وجود این عدم توجه و استقبال از توصیه کودی بر اساس تجزیه خاک یکی از ضعف‌های مدیریت حاصلخیزی خاک در کشاورزی استان به شمار می‌رود؛ بنابراین به‌طورکلی بخش عمده‌ای از پایین بودن کارایی مصرف کودها به عدم رعایت زمان صحیح مصرف با توجه به مراحل رشد گیاه و شیوه نادرست مصرف آن‌ها برمی‌گردد. از آنجاکه آب مهم‌ترین عامل محدودکننده رشد گیاه است افزایش مصرف کود به‌صورت متعادل در شرایطی که آب کافی وجود داشته باشد همراه با بهبود کارایی اهمیت زیادی خواهد داشت.

بنابراین با توجه با مشکلات فوق‌الذکر که عنوان شد در زمینه با حاصلخیزی خاک توصیه می‌گردد که مباحث زیر به‌صورت جدی مورد توجه و در دستور کار بهره‌برداران و ذینفعان عرصه کشاورزی در استان قرار گیرد:

- انجام آزمون خاک و تعیین مقدار عناصر غذایی

قابل جذب در خاک و کوددهی بر اساس آزمون خاک

- با توجه به کمبود کربن آلی در خاک‌های استان خوزستان استفاده از کودهای آلی کاملاً پوسیده شده (با در نظر گرفتن شوری اولیه خاک) قبل از کشت حتماً استفاده شود.

- کودهای نیتروژنی به‌صورت پایه و سرک و سایر کودهای شیمیایی (پرمصرف) به‌صورت پایه مصرف شوند. کودهای پایه مورد استفاده شامل بخشی از کودهای نیتروژنی و تمام کودهای فسفری و پتاسیمی است که کودهای ریزمغذی ترجیحاً قبل از کاشت و به‌صورت نواری و در عمق مناسب در زیر بذر (پایین بذر) به‌طوری‌که در زمان نیاز گیاه به مواد غذایی به‌راحتی در دسترس گیاه باشد استفاده گردد. در صورت استفاده از دستگاه کودکار- بذرکار مقدار کود فسفر و پتاسیم قابل استفاده (بر اساس آزمون خاک) تا ۳۰ درصد کاهش یابد.

- توصیه می‌شود عناصر کم‌مصرف همراه با آب آبیاری و همچنین به‌صورت محلول‌پاشی با غلظت و زمان مناسب استفاده نمود

است. کنش ما بین انسان و طبیعت و حربه فناوری و صنعت ناقص، باعث به وجود آمدن آلودگی‌های هوا، آب‌وخاک می‌گردد.

عملکردهای انسان در محیط به سه گروه فعالیت های جوامع شهری و روستایی، صنایع و کشاورزی تقسیم می‌شوند که باعث ایجاد آلودگی‌های مختلفی می‌گردند. آلودگی‌های مهم حاصله از زندگی اجتماعی و شهری شامل آلودگی هوا به خاطر سوزاندن سوخت‌های فسیلی و فاضلاب شهری و تولید زباله می‌باشند. زائدات صنعتی به گونه‌های فاضلاب صنعتی، زائدات جامد، گازها و مواد متصاعد و ایجاد حرارت باعث آلودگی‌های هوا، آب‌وخاک می‌گردند. فعالیت‌های کشاورزی و دامداری برای تهیه غذا به صورت متمرکز و عمدتاً غیرمتمرکز نیز به عنوان منابع آلوده کننده عمل می‌نمایند.

خاک‌ها همه ساله مقادیر هنگفتی از مواد زائد را دریافت می‌کنند. بیشتر دی‌اکسید گوگردی که از احتراق سوخت‌های گوگرددار تولید می‌گردد، نهایتاً به صورت سولفات به خاک وارد می‌شود. اکسیدهای نیتروژن در اتمسفر به نیترات تبدیل می‌شوند و این نیترات‌ها سرانجام بر خاک فرو می‌ریزند. خاک، NO_2 , NO را به سادگی جذب می‌کند و این گازها در خاک به نیترات تبدیل می‌شود. مونواکسید کربن و CO_2 احتمالاً توسط باکتری‌ها و قارچ‌های موجود در خاک به بیومس تبدیل می‌شود. در کنار جاده‌های پر رفت و آمد در نزدیکی معادن و کارخانه‌های ذوب سرب، مقدار زیادی ذرات معلق سرب وجود دارد. مقدار زیادی از آفت‌کش‌ها که برای محصولات کشاورزی استفاده می‌شوند به وسیله بافت اسفنجی خاک جذب شده و تجزیه این آفت‌کش‌ها در خاک منجر به آلودگی می‌گردد. جذب آفت‌کش‌ها در خاک با شسته شدن آن‌ها توسط آب همراه است، که احتمال آلودگی آب را در بر خواهد داشت. آثار آفت‌کش‌ها بر روی میکروارگانیسم‌ها و جانداران درون خاک و احتمال تولید مواد سمی‌تر در نتیجه فساد آفت‌کش‌ها در خاک، از جمله فاکتورهایی هستند که نباید از آن‌ها

• استفاده از کودهای زیستی (با توجه به اهمیت و جایگاه میکروارگانیسم‌ها در تغذیه گیاهی و چرخه عناصر غذایی در خاک، استفاده از کودهای زیستی و بر اساس توصیه‌های شرکت‌های سازنده و در زمان مناسب اقدام به کاربرد این کودها نمود).

• استفاده از محرک‌های رشد نظیر هیومیک اسید، آمینواسید و جلبک دریایی در طول دوره داشت استفاده شوند.

• چنانچه کوددهی پایه به خوبی انجام نشده باشد استفاده از کودهای کامل محلول مانند ۱۲ ۱۲ ۳۶ و ۵۲ ۱۰ ۱۰ در طول دوره رشد توصیه می‌شود.

• با توجه به کربنات کلسیم و pH بالای خاک‌های استان خوزستان از کودهای با خاصیت اسیدزایی استفاده شود. همچنین استفاده از اسیدهای کشاورزی نیز در طول دوره رشد توصیه می‌شود.

• با توجه به کیفیت پایین آب آبیاری در مناطق جنوبی استان خوزستان توصیه می‌شود حتماً هنگام محلول‌پاشی از ترکیباتی که pH نهایی محلول را کاهش می‌دهند استفاده شود. همچنین در صورت امکان از آب با کیفیت مطلوب جهت محلول‌پاشی استفاده گردد (Jafarnejad et al, 2024).

آلودگی منابع (خاک)

خاک همیشه برای زندگی انسان و سلامتی آن مهم بوده است مشروط بر آن‌که بتواند به عنوان منبعی سالم برای تولید غذا به کار رود (Afshari et al., 2015). به طور کلی آلودگی را می‌توان به صورت دو فاکتور اصلی طبیعی و انسانی مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. عوامل طبیعی عبارت‌اند از آب، خاک، هوا و زمین که علاوه بر اثرات فرسایشی باعث حمل و انتقال عوامل آلاینده از منابع مختلف یکدیگر می‌باشند و باعث تغییراتی فیزیکی و یا شیمیایی در آن می‌گردد. فاکتور انسانی در حقیقت به صورت تولیدکننده آلودگی‌ها به خاطر فعالیت‌های وی برای اسکان، شکل دادن، بهره‌برداری و کنترل نمودن محیط زندگی‌اش با به کارگیری فناوری و منابع انرژی

غافل شد. میزان جذب و سرعت و مقدار فساد نهایی تحت تأثیر چند عامل قرار دارند که بعضی از این عوامل، از جمله حلالیت، فراریت، بار، قطبیت و ابعاد و ساختار مولکولی، خواصی هستند که به خود آفت‌کش‌ها مربوط می‌شوند. عواملی دیگر از جمله دما، پ‌هاش و غیره، به خواص خاک پذیرنده مربوط هستند (Khuzestan province program and budget organization, 2013).

استان خوزستان از دیرباز در بخش کشاورزی دارای استعدادهای فراوان بوده است. امکانات جغرافیایی (داشتن خاک حاصلخیز، وجود رودخانه‌های دائمی و فصلی فراوان، وجود راه‌های آبی و خشکی و غیره) همگی باعث شده تا این استان به یکی از قطب‌های کشاورزی ایران تبدیل شود. علاوه بر قابلیت‌های ویژه جهت پیشبرد اهداف کلان کشور در بخش کشاورزی، ظرفیتی منحصر به فرد از لحاظ فعالیت‌های صنعتی در این استان وجود دارد که گاهاً سودآوری این صنایع بر دغدغه‌های زیست‌محیطی پیشی گرفته و موجبات آلودگی را فراهم ساخته است. افزایش فعالیت‌های صنعتی توأم با تولید آلاینده‌ها از جمله فلزات سنگین یکی از مشکلات جدی و در حال گسترش پیشروی انسان عصر حاضر است (Yalcin et al. 2007). مقاومت و پایداری عناصر سنگین در خاک نسبت به سایر آلاینده‌ها بسیار طولانی‌تر بوده و آلودگی خاک توسط فلزات سنگین تقریباً دائمی است (Ferri, et al. 2012). صنایع آهن و فولاد، استخراج از معادن، حمل‌ونقل جاده‌ای، نیروگاه‌ها و سوزاندن پسماند از عوامل ورود فلزات سنگین به خاک و آب در اکوسیستم‌های سطحی محسوب می‌شوند (Schwarz et al., 2016). عموماً هرچه غلظت فلزات سنگین در خاک افزایش یابد بر مقدار قابلیت دسترسی زیستی این عناصر افزوده می‌شود (Rang et al., 2013). با افزایش قابلیت دسترسی زیستی، جذب این عناصر توسط گیاه بیشتر شده و بنابراین فرآیندهای فیزیولوژیکی مانند تنفس، فتوسنتز، رشد سلولی، تعادل آب در گیاه، متابولیسم نیتروژن و تغذیه معدنی گیاه تحت تأثیر قرار می‌گیرند که نتیجه آن کاهش رشد گیاه خواهد بود. جذب بیش از حد این

عناصر توسط گیاهان و ورود به زنجیره غذایی، سلامتی انسان را مورد تهدید قرار می‌دهد (Cui et al., 2005). این فلزات در مقادیر بالا می‌توانند باعث اختلالات مورفولوژیکی، کاهش رشد، افزایش مرگ‌ومیر و اثرات ژنتیکی در انسان شوند (Fiket et al., 2007). حجتی (۲۰۱۷) در مطالعه‌ای در خاک‌های منتخب شمال استان خوزستان که به منظور ارزیابی آلودگی و توزیع منبع فلزات آرسنیک، سرب و مس با استفاده از شاخص‌های آلودگی و تحلیل مؤلفه‌های اصلی انجام داد به این نتیجه رسید که منشأ فلزات مس و سرب با غنی‌سازی متوسط تا زیاد در این منطقه، هر دو عامل منابع طبیعی و انسانی است، این در حالی است که منشأ آرسنیک در این خاک‌ها عمدتاً تحت تأثیر منشأ لیتوژنیک قرار می‌گیرد؛ بنابراین استان خوزستان در جنوب غربی ایران، یکی از مراکز مهم کشاورزی و صنعتی در کشور است. کشاورزی گسترده و کاربرد سموم و آفت‌کش‌های شیمیایی، استفاده از کمپوست و لجن فاضلاب از یک‌سو و تعدد صنایع مستقر در منطقه از جمله صنایع مرتبط با فولاد، نفت و همچنین پدیده غالب گردوغبار از سوی دیگر، اهمیت زیست‌محیطی و لزوم بررسی میزان آلودگی فلزات با پتانسیل آلودگی زیاد را در خاک‌های این منطقه دوچندان می‌کند.

تغییر کاربری اراضی

با توجه به اینکه مبحث تغییر کاربری اراضی کشاورزی، یکی از مهم‌ترین چالش منابع خاک کشور به‌ویژه در اراضی حاصلخیز کشاورزی بوده و دارای پیامدهای منفی اقتصادی، اجتماعی، فرهنگی و امنیتی نیز است، لذا روند تعیین وضعیت قابلیت کشاورزی اراضی و چالش‌های موجود در استان خوزستان به‌صورت تفصیلی در این بخش بیان شده است.

روند تعیین قابلیت اراضی کشاورزی

تعیین کیفیت اراضی در قالب کلاس‌های طبقه‌بندی اراضی و بر اساس استانداردهای موجود در دستورالعمل ۲۰۵ و شیوه‌نامه موسسه خاک و آب ارزیابی

است (Soil and Water Research Institute. 1989). که این دستورالعمل بر اساس بررسی ۱۸ گانه ویژگی‌های مهم در رابطه با خصوصیات خاک و اراضی، اراضی را در شش کلاس مختلف I تا VI طبقه‌بندی می‌کند. در طبقه‌بندی اراضی که با هدف تعیین قابلیت اراضی برای انجام آبیاری سطحی انجام می‌گیرد، خصوصیات از اراضی و خاک اندازه‌گیری و تعیین می‌شود که برای مدیریت اراضی کشاورزی بسیار حائز اهمیت است. بر اساس این راهنما، اراضی با توجه به محدودیت‌های چهارگانه (محدودیت خاک، شوری و قلیائیت، ناهمواری و فرسایش و خیس) که هر یک با تعیین خصوصیات مختلف اراضی و خاک تعیین می‌گردد، در کلاس‌ها و تحت کلاس‌های مشخص، طبقه‌بندی می‌شود.

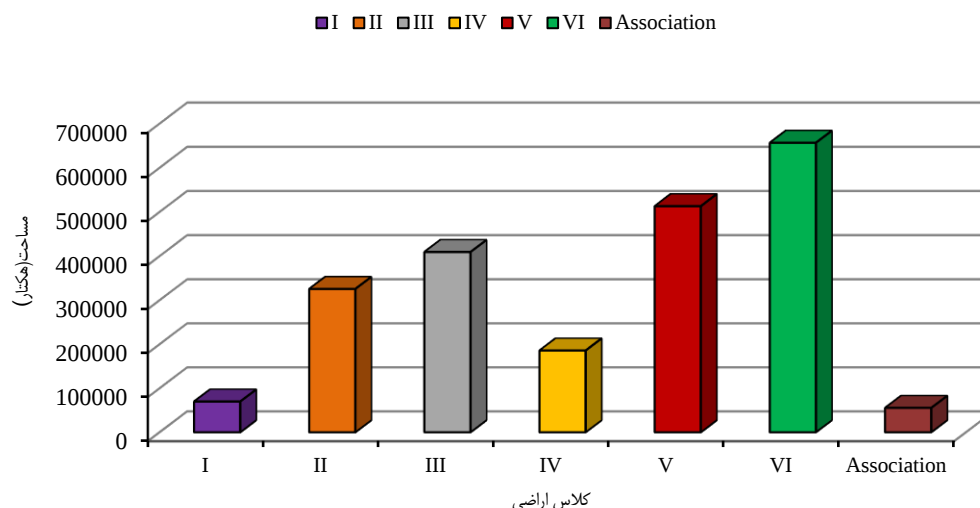
لذا در ادامه با توجه به مطالب ارائه‌شده روند بررسی، وضعیت پراکنش کلاس‌های اراضی و محدودیت‌های موجود در استان و چالش‌ها و پیشنهادها، مربوطه در رابطه با وضعیت اراضی استان خوزستان بیان شده است.

وضعیت قابلیت کشاورزی اراضی در خوزستان

وسعت اراضی استان خوزستان حدود ۶/۵ میلیون هکتار، نزدیک به ۲/۵ میلیون هکتار به‌صورت کوه و تپه است. از چهار میلیون هکتار مابقی اراضی که مشتمل بر دشت‌های دامنه‌ای، دشت‌های رودخانه‌ای، اراضی پست و

سیل‌گیر، واریزه‌ای و اراضی ماندابی است. هر چند اگر تالاب‌ها، دریاچه‌های طبیعی، تپه‌های شنی و سایر اراضی کم‌بازده را نیز کسر نماییم حدود ۲/۸ میلیون هکتار اراضی باقی می‌ماند که شامل اراضی مناسب برای کشاورزی و اراضی دارای محدودیت شوری و قلیائیت می‌باشند. نتایج حاصل از مطالعات خاکشناسی نشان می‌دهد که حدود یک میلیون هکتار از اراضی در حال حاضر بدون محدودیت و یا دارای محدودیت کم تا متوسط و حدود ۱/۸ میلیون هکتار به‌صورت اراضی بایر و بدون استفاده می‌باشند (Jafarejadi et al., 2024).

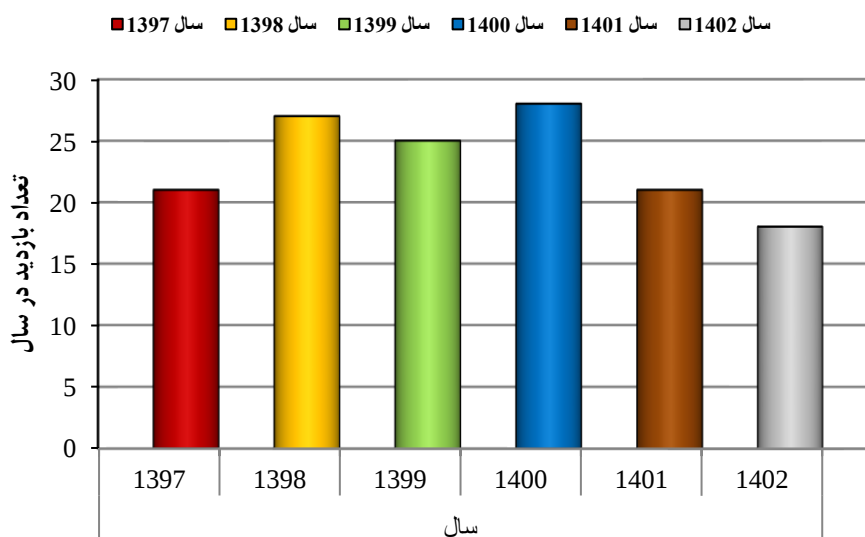
بنابراین بر اساس اطلاعات موجود در نقشه قابلیت اراضی مربوط به مؤسسه تحقیقات خاک و آب وزارت جهاد کشاورزی وسعتی بالغ بر ۲/۱۳۳/۷۳۷ هکتار از خاک‌های استان خوزستان که حدود ۳۳/۷ درصد وسعت کل استان را در بر می‌گیرد، از لحاظ وضعیت منابع خاک و طبقه‌بندی اراضی به شرح ذیل است (شکل ۳): که طبق آمار موجود بیشترین مساحت اراضی مطالعه شده در استان اراضی کلاس VI (غیرقابل کشت) با مساحت حدود ۶۵۶۵۵۱ هکتار که ۲۹/۶۳ درصد کل اراضی را تشکیل می‌دهد و کمترین مساحت به اراضی کلاس I (قابل کشت) با مساحت حدود ۶۹۷۸۷ هکتار که ۳/۱۵ درصد کل اراضی را تشکیل می‌دهد. شایان ذکر است که از مجموع اراضی فوق‌الذکر ۵۵۳۶۵ هکتار معادل ۲/۵ درصد به‌صورت مخلوط و متفرقه گزارش شده‌اند.



شکل ۳- وضعیت طبقه‌بندی اراضی در استان خوزستان (مساحت کلاس اراضی)
Figure 3- Status of land classification in Khuzestan province (Area of land classes)

اقتصادی و اجتماعی، اقلیمی و ...) بی‌ارتباط نباشد، هر چند که در سال‌هایی که شرایط پایداری برای کشاورزی از لحاظ وضعیت اقلیمی (دما و بارش) فراهم شود معمولاً متقاضیان بیشتر به کار کشاورزی مشغول بوده و تعداد مراجعات کاهش پیدا می‌کند.

به‌طورکلی با توجه به اطلاعات و آمار موجود (شکل ۴) تعداد مراجعات در سال‌های مورد بررسی متفاوت بوده است و بیشترین تعداد در سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۳۹۸ اتفاق افتاده است و کمترین تعداد در سال ۱۴۰۲ بوده است که شاید علت آن با شرایط حاکم بر کشور (شرایط



شکل ۴ - وضعیت آمار بازدید اراضی در استان خوزستان در دامنه سال‌های ۱۳۹۷-۱۴۰۲ (آمار بازدیدهای صورت گرفته در هر سال)
Figure 4- Status of land visit statistics in Khuzestan province in the range of 1397-1402 (statistics of visits made in each year)

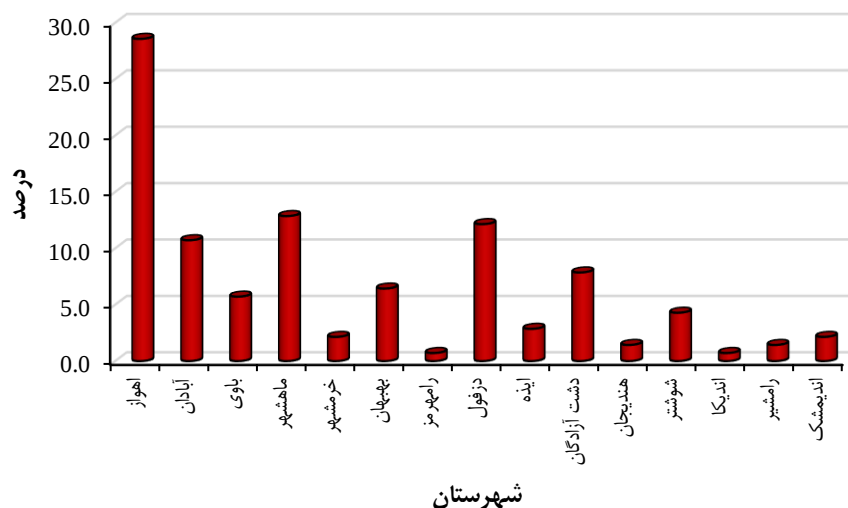
صنایع، کارگاه‌ها و کارخانه‌ها، طرح‌های گردشگری، پرورش ماهی و میگو و نهایتاً احداث گلخانه است. اخیراً نیز، با توجه به جهش ملی مسکن، تقاضای تغییر کاربری

بررسی درخواست‌ها در دامنه سال‌های ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۲ در استان خوزستان نشان می‌دهد که بیشترین درخواست‌های کاربری اراضی به ترتیب مرتبط با احداث

به‌منظور ساخت مسکن در حال افزایش است، نویدی و همکاران (۲۰۲۳) در یک بررسی ملی نتیجه مشابهی را گزارش نموده‌اند.

مطابق با نتایج ارائه‌شده در شکل شماره ۵ که سهم هر شهرستان از بازدیدهای صورت گرفته در دامنه مورد بررسی را نشان می‌دهد، تعداد مراجعه‌ها جهت بازدید اراضی در شهرهای مختلف دارای نوسان است و اما بررسی نتایج کلی در دامنه موردبررسی حکایت از این دارد که بیشترین متقاضیان پرونده‌های بازدید اراضی پنج سال اخیر مربوط به شهر اهواز بوده است و بعد از آن شهرهای ماهشهر و دزفول به ترتیب در جایگاه بعدی قرار دارند. مهاجرت، یکی از دلایل اصلی تغییر کاربری زمین در شهرهای بزرگ کشور ازجمله اهواز است. شهر اهواز به عنوان یکی از مهم‌ترین مراکز صنعتی کشور با دارا بودن کارخانه‌های و صنایع نفت به‌عنوان یکی از شهرهای مهاجرپذیر کشور مطرح است. هر چند که این موضوع

سابقه طولانی دارد و از زمان وقوع جنگ هشت‌ساله ایران و عراق به دلیل تخریب شهرهای ساحلی و انهدام صنایع و تأسیسات مشابه و از کار افتادن صنایع و مراکز بزرگ اشتغال و تأسیسات بنادر نیز باعث شد تا جمعیت این مناطق به اهواز و سایر شهرهای کشور مهاجرت اجباری نمایند (Amanpour et al., 2017) و این مهاجرت ادامه دارد. در این زمینه محرومیت‌زدایی و ایجاد راهبردهای مناسب برای اشتغال و کارآفرینی در مناطق روستایی و حاشیه‌ای و امکانات و خدمات زیربنایی مناسب در شهرهای کوچک، به تثبیت جمعیت در این نواحی و جلوگیری از مهاجرت جمعیت به شهرهای بزرگ ازجمله اهواز می‌انجامد. این امر نیز کاهش تغییر کاربری زمین را در پی دارد و در ضمن یکی از بحران‌های اصلی در مورد تغییرات کاربری ارضی، تبدیل زمین‌های کشاورزی و باغات به مناطق شهری است که لزوم توجه به این زمینه بیش از پیش در مطالعات احساس می‌شود.



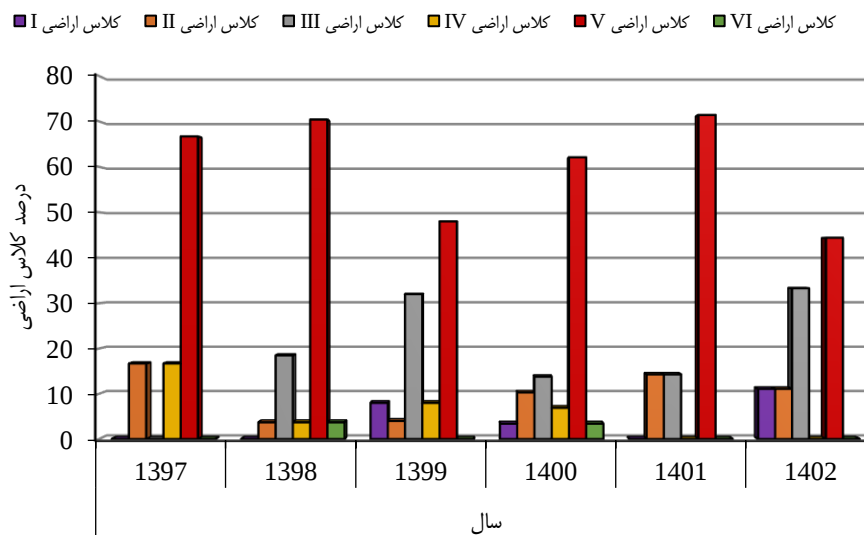
شکل ۵- فراوانی بازدیدهای صورت گرفته در هر شهرستان در دامنه سال‌های ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۲
Figure 5- The frequency of visits made in each city in the range of 2018 to 2023

بررسی نتایج وضعیت پراکنش و درصد کلاس‌های اراضی تعیین‌شده در هر سال (شکل ۶) نشان می‌دهد که دامنه تغییرات کلاس‌های طبقه‌بندی اراضی از I تا VI با تحت کلاس‌های مختلف متغیر است ولی بیشترین

پراکنش کلاس‌ها در هر سال مربوط به کلاس‌های V و III است. که غالب کلاس‌های V موجود مربوط به محدودیت شوری و قلیائیت خاک است. بایستی مد نظر داشت که با توجه به اینکه پدیده شوری و قلیائیت ایستا نبوده و دینامیک

است و با توجه به فصل بازدید متفاوت است در صورت مدیریت مناسب آبیاری و اصلاح خاک، بهره‌برداری خاک ممکن است و به‌طوری‌که در برخی موارد دولت با هزینه هنگفت در استان خوزستان و امثال طرح ۵۵۰ هزار هکتاری طرح آبیاری و زهکشی پیاده کرده و اراضی را احیا نموده است، یعنی اینکه بستر و زیرساخت برای اصلاح این نمونه خاک‌ها فراهم است و اگر بهره‌بردار قصوری به خرج دهد و اراضی را مدیریت نکند طبیعی است که با توجه به وضعیت اقلیمی استان خوزستان (بارندگی کم و گرمای زیاد) شوری و املاح خاک افزایش خواهد یافت و املاح محلول با نیروی کاپیلاری به سطح خاک منتقل خواهد شد؛ و لذا اراضی با محدودیت شوری غالب شده و امکان عدم بهره‌وری کشاورزی و مستعد بودن به تغییر کاربری در این قبیل اراضی قوت خواهد گرفت و در بازه زمانی نه‌چندان زیاد با توجه به اینکه غالب اراضی جنوب و غرب استان دارای شرایط مشابه می‌باشند از قابلیت کشاورزی ساقط خواهند شد؛ بنابراین با توجه به شیوه‌نامه تعیین قابلیت اراضی موجود (نشریه ۲۰۵) که در این طبقه‌بندی که برای تعیین محدودیت‌های اراضی برای آبیاری سطحی گیاهان یک‌ساله طراحی شده است، چون برای محدودیت‌های شوری و قلیائیت و محدودیت خیزی (حضور آب در خاک) کلاس چهار وجود ندارد اراضی با کمترین اختلاف شوری با توجه به بازه شوری موجود در دستورالعمل در دو کلاس متفاوت (کلاس‌های V و III) قرار می‌گیرند و

باعث اختلاف در دید بهره‌برداران و همچنین عدم مدیریت و تصمیم‌گیری جامع می‌شود و در نتیجه با توجه به اینکه غالب اراضی مرکزی، جنوب و غرب خوزستان دارای محدودیت‌های شوری و در برخی مناطق عمق آب زیرزمینی را دارند، لازم است دستورالعمل حاضر نسبت به این دو محدودیت بازنگری و اصلاح شود و همچنین لازم به ذکر است که در رابطه به سایر کلاس‌ها و محدودیت‌ها نیز، همان‌طور که زین‌الدینی و همکاران (۲۰۱۳) نیز مطرح نموده‌اند، تحت کلاس‌های مختلف بر روی کیفیت اراضی برای واگذاری از ارزش یکسانی برخوردار نیستند، به‌طوری‌که در برخی موارد اراضی دارای یک نوع تحت کلاس خاص از کلاس II، دارای شرایط نامناسب‌تری نسبت به یک زیرکلاس از کلاس III می‌باشند و به نظر می‌رسد در فرایند واگذاری اراضی در مبحث بررسی کیفیت اراضی موردبررسی، روش‌های موجود کارایی لازم را نداشته و چه بسا اراضی که به‌سادگی قابل اصلاح بوده‌اند بنا به شرط و شروط‌های قراردادی (مثلاً کلاس IV) و بالاتر به‌منظور استفاده غیر کشاورزی واگذار می‌شوند؛ بنابراین دستورالعمل و روش‌های مورد استفاده نیاز به بازنگری و حتی تحول اساسی دارد. که مطابق توصیه همکاران در این رابطه مطالعه کافی و اعمال روش‌های مبتنی بر یافته‌های علمی و تجربیات کارشناسی دقیق می‌تواند بسیار مؤثر باشد.



شکل ۶- وضعیت پراکنش کلاس‌های اراضی تعیین شده در هر سال

Figure 6- The state of the distribution of land classes determined in each year

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

رشد روزافزون جمعیت همراه با محدودیت گسترش زمین‌های زراعی منجر به ضعف توان‌بخش کشاورزی در تأمین غذای مردم جهان شده است. از سوی دیگر همین مقدار زمین‌های محدودی که وجود دارند نیز به دلیل استفاده نادرست، در درازمدت کیفیت خود را از دست داده و باعث ناپایداری تولیدات کشاورزی شده است؛ بنابراین برای داشتن تولید پایدار، می‌بایست در طول زمان، کیفیت خاک به‌عنوان بستر تولید محصول، حفظ شود؛ بنابراین عواملی چون آبیاری بی‌رویه با استفاده از آب‌های شور، بی‌توجهی به پتانسیل اراضی برای بهره‌برداری، تغییر کاربری اراضی بدون توجه به استعداد آن، تغییرات رژیم هیدرولوژی زیست‌بوم‌ها، از بین بردن پوشش گیاهی بومی منطقه در اثر خشک‌سالی‌های انسان‌ساز و عدم امکان توسعه مجدد آن، عدم به‌کارگیری فن‌آوری‌های نوین در بهره‌برداری از اراضی، عدم استفاده از تناوب کشت، خاک

را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در همین راستا با توجه بر اهمیت حفظ خاک‌های مناسب برای کشاورزی که ارتباط مستقیم با امنیت غذایی دارد، بایستی قوانین مستحکم‌تر و سخت‌گیرانه‌تری در ارتباط با صدور مجوز در این اراضی لحاظ گردد و با توجه به ضرورت اهمیت خاک برای تداوم زندگی بشری و بیان آمار نگران‌کننده در خصوص این عنصر طبیعی انتظار می‌رود وضعیت بحرانی موجود برای قشرهای مختلف به‌ویژه کشاورزان تشریح شود و با ارائه برنامه‌های فرهنگی، آموزشی و ترویجی، بهره‌برداران خاک را نسبت به این موضوع حساس کرد تا با فرهنگ‌سازی بیشتر از این منبع خدادادی صیانت بیشتری داشته باشیم.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید نویسندگان مقاله است.

Reference

1. Abdulahi, M., Jafari, S., Sadeghi B. 2010. The effect of different soil preparation factors on soil characteristics in Khuzestan province. The 5th National Conference of New Ideas in Agriculture, Khorasgan, Isfahan (in Persian).
2. Afshari, A., Khademi, H., & Alamdari, P. (2015). Determination of Natural and Anthropogenic Factors on Pollution of Heavy Metals in the Central Zanjan (Based on Multivariate Analysis). *Water and Soil*, 29(5), 1320-1332(in Persian).

3. Amanpour, S., Kamelifar, M. J., Bahmani, H. 2017. 'An Analysis of landuse changes in metropolises using satellite imagery analysis in the ENVI environment Case study: Ahvaz metropolis', Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR), 26(102), pp. 139-150 (in Persian). **doi: 10.22131/sepehr.2017.27463**
4. Amini Nesab, S.M. 2004. The challenges of managing soil resources as a national capital, with an emphasis on ways to prevent its loss. Conference on methods of preventing the loss of national resources, Tehran, page 537-546(in Persian).
5. Arabameri, A., H. R. Pourghasemi and A. Cerda. 2018. Erodibility prioritization of sub-watersheds using morphometric parameters analysis and its mapping: A comparison among TOPSIS, VIKOR, SAW, and CF multicriteria decision making models. Science of the Total Environment 613-614: 1385-1400.
6. Asadi, H., Besharati, H., & Gorji, M. 2022. Challenges and Limitations of Soil and Land Resources in Iran. *Land Management Journal*. 10(1): 111-134 (in Persian). **doi: 10.22092/lmj.2022.358760.309**
7. Banaei, M. H., 2002. Map of Iran's soil resources and potential. Soil and Water Research Institute, Tehran, Iran, 6 pages (in Persian).
8. Cui, Y., Zhu, Y.G., Zhai, R., Huang, Y., Qin, Y., and Liang, J. 2005. Exposure to metal mixtures and human health impacts in a contaminated area in Nanning, China. *Environment International*. 31: 784-790.
9. Darwish, T., Atallah, T., El Moujabber, M. and Khatib, N., 2005. Salinity evolution and crop response to secondary soil salinity in two agro-climatic zones in Lebanon. *Agricultural water management*, 78(1-2), 152-164.
10. Davoudi, S., Ghafari, H., Farrokhan Firouzi, A. 2024. Spatial Estimation of Soil Erosion and Sediment Yield in GIS Environment Using SEDD and RUSLE Models: A Case Study Roudzard Watershed in Khuzestan Province. *Jwmseir*. 18 (66) : 1
11. FAO/UNDP. 1972. Calcareous soils. Report of the Regional Seminar on Reclamation and Management of Calcareous Soils. 27 Nov., Cairo. Egypt.
12. Ferri, R., Donna, F., and Smith, D.R. 2012. Heavy metals in soil and salad in the proximity of historical ferroalloy emission. *J. Environ. Prot.* 3: 5. 374-384.
13. Fiket, Z., Roje, V., Mikac, N., and Kniewald, G. 2007. Determination of arsenic and other trace elements on bottle waters by high resolution inductivity coupled plasma mass spectrometry.
14. Gholami, A., baghernejad, M., Azadi, A., Shakeri, S. 2021. 'Effect of Long Term Rice Cultivation on Potassium Status, Clay Mineralogy and Some Physicochemical Properties of Calcareous Soils in Fars Province', *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(1), pp. 123-141 (in Persian). **doi: 10.22059/ijswr.2020.310326.668741**
15. Heidarian, P., Azhdari, A., Jodaki, M., Darvishi Khatooni, J., Shahbazi, R. 2017. 'Identifying interior sources of dust storms using remote sensing, GIS and geology (case study: Khuzestan province)', *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 27(105), pp. 33-46 (in Persian) .**doi: 10.22071/gsj.2017.53928**
16. Hojati, S. 2017. Pollution assessment and source apportionment of arsenic, lead and copper in selected soils of Khuzestan Province, southwestern Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 10:528.
17. Information base of the Agricultural and Natural Resources Engineering Organization of IRAN, 2023. Available at: <https://agrieng.org/orgreport/item/2161>
18. Jafarnejadi, A., Meskini vishkaei, F. 2024. Status and management of soil fertility and plant nutrition in Khuzestan. Karaj: Soil and Water Research Institute (in Persian).
19. Jafarnejadi, A., Meskini vishkaei, F., Azadi.A. 2024. Practical principles of balanced nutrition of agricultural crops of Khuzestan province, volume one: wheat, barley and rice. Isfahan. Iran (in Persian).
20. Jafarnejadi, A., Davatgar, N., Meskini vishkaei, F., Tafteh, A. 2017. Study of spatial changes and salinity zoning (geostatistics) of agricultural lands in Khuzestan Province. The First National Conference on Salting .National Salting Research Center, Yazd -Iran (in Persian).

21. Jafari, S. 2020. Effects of Dam Construction and the Karoon River's Change of Hydrology Regime on Soil Salinity and Dust Storms of Khuzestan Plain. *Irrigation Sciences and Engineering*, 43(1), 157-172(in Persian).
22. Jafari, S, and Nadian, H. 2014. The Study of a Toposequence Soil Series and Clay Mineral Assemblage in some Soils of Khozestan Province. *JWSS*, 18 (69), pp.151-164(in Persian).
23. Jafari, S. 2013. Identifying the diversity of soils in Khuzestan province. Ramin University of Agriculture and Natural Resources. Research project number 188-18(in Persian).
24. Jafari, S., Hajishah, M., and Hamadi Sawari, C. 2010. Causes and origins of salinity and salinization of lands in the south of Khuzestan. 3rd National Conference on Management of Irrigation and Drainage Networks, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz (in Persian).
25. Keshavarzi, A., F. Sarmadian, R. Labbafi and A. Ahmadi. 2011. Developing pedotransfer function for estimating field capacity and permanent wilting point using fuzzy table look-up scheme. *Computer and Information Science* 4: 130-141.
26. Khasanov, S., Li, F., Kulmatov, R., Zhang, Q., Qiao, Y., Odilov, S., Yu, P., Leng, P., Hirwa, H., Tian, C. and Yang, G., 2022. Evaluation of the perennial spatio-temporal changes in the groundwater level and mineralization, and soil salinity in irrigated lands of arid zone: as an example of Syrdarya Province, Uzbekistan. *Agricultural Water Management*, 263, 107444.
27. Khavazi, K. 2014. Introduction to the comprehensive program of soil fertility and plant nutrition 1393-1404. Volume 1. Karaj: Soil and Water Research Institute (in Persian).
28. Keshavarz, P., Zangiabadi, M., & Abbaszadeh, M. 2013. The effect of soil moisture and salinity on the relationship between soil organic carbon and wheat yield. *Iranian Journal of Soil Research*, 27(3), 271-259.
29. Khuzestan province program and budget organization. 2013. Khuzestan province study studies, natural resources report, environmental studies of the province. Volume 9, 258 pp.
30. Litalien, A. and Zeeb, B., 2020. Curing the earth: A review of anthropogenic soil salinization and plant-based strategies for sustainable mitigation. *Science of the Total Environment*, 698, 134235.
31. Momeni, A., 2011. Geographical distribution and salinity levels of Iran's soil resources. *Journal of Soil Research (Soil and Water Sciences): A*, 24 (3): 215-203, (in Persian).
32. Moshiri, F., S. Samavat, and M.R. Balali. 2017. Soil organic carbon: A key factor of sustainable agriculture in Iran. pp. 492-496. Proceedings of the global symposium on soil organic carbon. 21-23 March. FAO, Rome, Italy.
33. Moshiri F., Safari, H., Keshavarz P. and Zahedi Fard, N. 2021. Soil organic matter and its place in Iran's agriculture, examining the current situation, analyzing problems and limitations, providing solutions. Karaj: Soil and Water Research Institute, 74 p. (in Persian).
34. Mullayi Hashjin N, Mullaee Pardeh S. 2014. Spatial analysis regarding agricultural development in Khuzestan's counties. *Journal Space Economy & Rural Development*, 3 (8) :19-38(in Persian).
35. Navidi, M., Asadi Rahmani, H., Chatrenour, M., Kharazmi, R., Jamshidi, M., Ziaee Javid, A., MohamadEsmail, Z., ebrahimi meymand, F. 2023. 'Changes in Agricultural Land Use as a Threat to Food Security', *Land Management Journal*, 11(2), pp. 229-248 (in Persian). **doi: 10.22092/lmj.2023.362757.336.**
36. Norouzi, S., Sohrabi, A., Khavazi, K., & Matinfar, H. R. 2018. Effect of Sulfur Application on Soil pH and Phosphorus Availability for Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Sol Biology*, 6(1), 29-41 (in Persian).
37. Noroozi, A. and Shoaee, Z. 2018. Identifying areas with dust generation potential in the south west of Iran, case study: Khuzestan Province. *Watershed Engineering and Management*, 10(3), 398-409. **doi: 10.22092/ijwmse.2018.117329**
38. Qureshi, A. S., Qadir, M., Heydari, N., Tural, H., Javadi, A. 2007. A review of management strategies for salt-prone land and water resources in Iran. International Water Management Institute, IWMI Working Paper 125, Colombo, Sri Lanka, 30 p.

39. Rangzan, N., Datta, S.P., Rattan, R.K., Dwivedi, B.S., and Meena, M.C. 2013. Prediction of the solubility of zinc, copper, nickel, cadmium and lead in metal contaminated soils. *Environmental Monitoring and Assessment*. 185: 10015-10025.
40. Rezaei, K. 2022. Classification and determination of erodibility indices of marls in southeast of Pishva-Varamin area using rainfall simulator. *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, 7(26), 53-39.
41. Roozitalab, M.H., H. Siadat, and A. Farshad. 2018. *The Soils of Iran*. World Soils Book Series. Springer, Switzerland.
42. Saadat, S., 2019. Final report of agricultural soil quality monitoring. Soil and Water Research Institute. Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), (in Persian).
43. Saadat, S., Rezaei, H., Esmaeelnejad, H., Mirkhani, R. and Bagheri, Y. R. 2023. Salinity map of Iran's agricultural soils. Technical Journal No. 630, Soil and Water Research Institute of Iran (in Persian).
44. Saadinejad, S., Jafarnjadi, A., Gholami, A. and Moazi, A. 2013. Investigating the spatial changes of absorbable copper and manganese in the soils of wheat fields in the north of Khuzestan province. *Agricultural Engineering*, 36(2), pp 69-80(in Persian).
45. Savari Z, Hojati S, Taghizadeh Mehrjerdi R. 2021. Digital Mapping of Surface Soil Salinity in Khuzestan Province, Using Regression Kriging. *JWSS*. 25 (3), pp: 159-175(in Persian).
46. Saidian, H., and Aghamirzadeh, A. 2022. An overview of different methods of dealing with water erosion in the world. *Journal of Water Conservation and Productivity*, 1(6):32-44(in Persian).
47. Schwarz, K., Pouyat, R.V., and Yesilonis, L. 2016. Legacies of lead in charm city's soil: lesson from the Baltimore ecosystem study. *Inter. J. Environ. Res. Public Health*. Pp: 209-223.
48. Seyedmohammadi, J., Esmaeelnejad, L., Ramezanzpour, H. 2016. 'Increasing Efficiency of Soil Fertility Map for Rice Cultivation Using Fuzzy Logic, AHP and GIS', *Water and Soil*, 30(4), pp. 1114-1129 (in Persian). **doi: 10.22067/jsw.v30i4.38868**
49. Shabbazi, K., & Besharati, H. 2013. Overview of Agricultural Soil Fertility Status of Iran. *Land Management Journal*, 1(1), 1-15. **doi: 10.22092/lmj.2013.100072**
50. Shahraini, E. and Noroozi, A.A., 2022. Modeling and Mapping of Soil Salinity and Alkalinity Using Remote Sensing Data and Topographic Factors: A Case Study in Iran. *Environmental Modeling & Assessment*, 27(5), 901-913.
51. Soil and Water Research Institute. 1989. Guide to land classification for irrigation. Technical Journal No. 766 (translation of Technical Journal No. 205). Tehran. Iran (in Persian).
52. Soil Survey Staff. 1999. *Soil Taxonomy*. Second Edition. USDA, NRCS.
53. Soleimani, F., Kalehhouei, M., & Lotfollazadeh, D. 2023. Study of the Morphological Characteristics of Gullies in Khuzestan Province. *Watershed Management Research*, 36(3), 23-41 (in Persian).
54. Taherzadeh, M.H., Hasani, A. and Bani Nameh, J., 2003. Geological map of Khuzestan province. Agricultural and Natural Resources Research Center of Khuzestan Province (in Persian).
55. Yalcin, M.G., Battaloglu, R., and Ilhan, S. 2007. Heavy metal sources in Sultan Marsh and its neighborhood, Kayseri, Turkey. *Environmental Geology*. 53: 399-415.
56. Zaman, M., S. A. Shahid and L. Heng. 2018. *Guideline for salinity assessment, mitigation and adaptation using nuclear and related techniques*. Springer, Switzerland.
57. Zare, N., Hassounizadeh, H., Shahinzadeh, N., Roshanfekr, Q., Bahramalipour, M. 2017. Spatial distribution of some soil characteristics of agricultural lands in South Ahvaz-Khuzestan, 15th Congress of Soil Sciences of Iran, 28-30 August, Isfahan (in Persian).
58. Zeinoddini-Meymand, A, Jamshid, M, and Ebrahimi Meymand, F. 2013. Investigating the effectiveness of the land classification system in Iran for land transfer. Karaj: Soil and Water Research Institute (in Persian).

کاربرد بیوپار در آلودگی‌زدایی آب‌و خاک از آرسنیک: یک رهیافت امیدبخش و

دوستدار محیط‌زیست

عادل ریحانی تبار* 

استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

areyhani@tabrizu.ac.ir

دریافت: تیر ۱۴۰۳ و پذیرش: اسفند ۱۴۰۳

چکیده

امروزه آلودگی منابع آب‌و خاک به شبه فلز آرسنیک (As) یکی از معضلات نگران‌کننده سلامتی انسان‌ها است. این عنصر توسط سازمان بهداشت جهانی به‌عنوان یک ماده سرطان‌زا معرفی‌شده و برای گیاهان نیز سمی است. روش‌های آلودگی‌زدایی خاک‌های آلوده به آرسنیک متنوع و شامل روش‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی است. هر کدام از این روش‌ها دارای محاسن و معایب خاص خود هستند. بیوپار، به‌عنوان بخشی از راه‌حل، با استفاده از فرایندهای مختلف گرما شیمیایی از بقایای محصولات کشاورزی، پسماند جامد شهری و کودهای دامی تولید می‌شود. اهداف کاربرد بیوپار در چهار بخش کلی بهبود حاصلخیزی خاک، ترسیب کربن در خاک، احیای اراضی تخریب یافته و مدیریت آلودگی آب‌و خاک بیان شده است. مطالعات کمی در مورد غیرمتحرک کردن آرسنیک در خاک نسبت به محیط‌های آبی انجام شده است. اما آنچه مسلم است علاقه به تحقیقات در مورد مکانیسم عمل بیوپار برای پالایش آرسنیک در آب‌و خاک‌های آلوده و توجه به جنبه‌های کاربردی در مقیاس مهندسی رو به افزایش است. در این نوشتار ابتدا به‌طور مختصر به شیمی آرسنیک در آب‌و خاک اشاره و بعداً به برخی از تحقیقات انجام‌شده در مورد برهمکنش بیوپار و آرسنیک اشاره می‌شود. در نهایت چنین نتیجه‌گیری می‌شود که نوع زیست‌توده اولیه و شرایط پیرولیز از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر برهمکنش بیوپار- آرسنیک می‌باشند. همچنین جزءبندی گونه‌های مختلف آرسنیک در خاک ممکن است تحرک، زیست‌فراهمی و انتقال آرسنیک را در حضور بیوپار به علت تغییر در شیمی خاک تحت تأثیر قرار دهد که تاکنون مطالعه جامعی راجع به این موضوع انجام نشده است. برهمکنش بیوپار و میکروب‌های خاک در ارتباط با غیرمتحرک کردن گونه‌های سمی آرسنیک باید مورد مطالعه قرار گیرد. هیچ یک از مطالعات انجام شده تاکنون تجزیه و تحلیل هزینه-سود برای کاربرد بیوپار جهت آلودگی‌زدایی آب‌و خاک انجام نداده است که می‌تواند به‌عنوان یک شکاف در تحقیقات مربوط به برهمکنش آرسنیک-بیوپار در نظر گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: آرسنیک، آب، بیوپار، خاک، گیاه

* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: areyhani@tabrizu.ac.ir

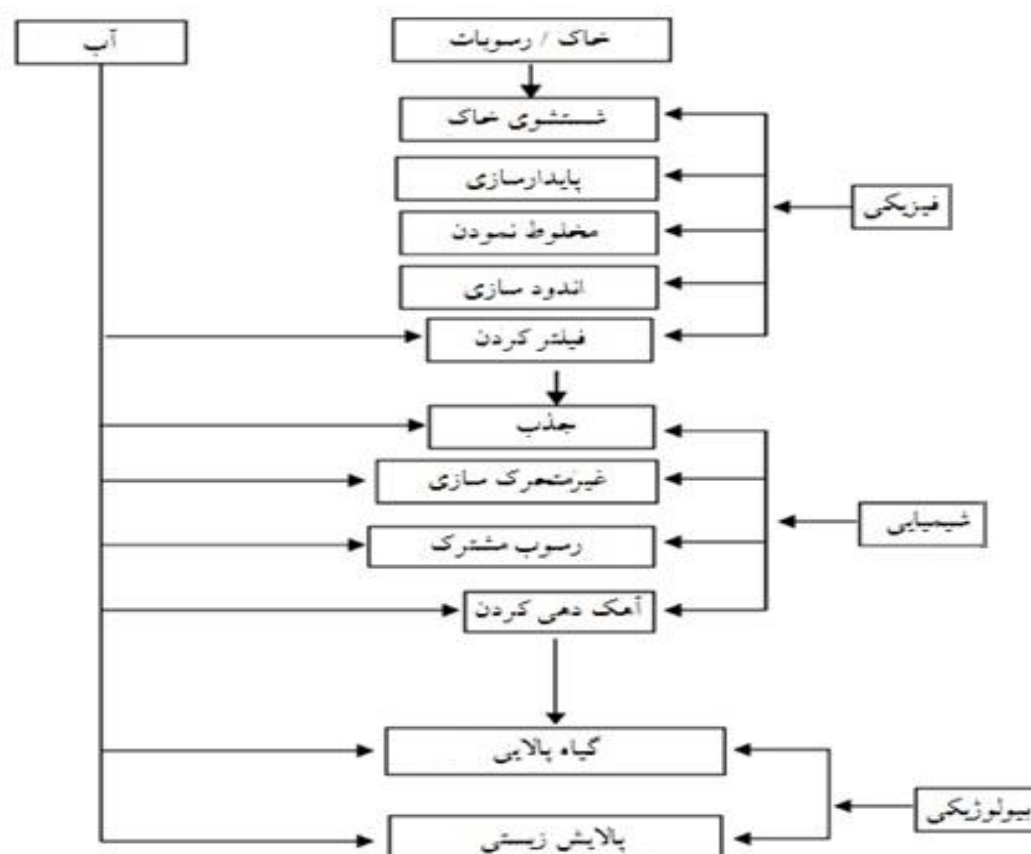
نوع مقاله: مروری



مقدمه

آرسنیک به صورت طبیعی در محیط زیست وجود دارد، اما فعالیت های بشری میزان آن را افزایش داده است. توصیه سازمان بهداشت جهانی برای غلظت مجاز آرسنیک در آب آشامیدنی ۱۰ میکروگرم در لیتر و به اعتقاد آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا، بیشینه غلظت آرسنیک در خاک ۲۰ میلی گرم در کیلوگرم است (Adriano., 2001). در بدن انسان هم غلظت ۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم مقدار مخاطره آمیز آرسنیک بیان شده است (Naidu et al., 2003). آرسنیک توسط سازمان بهداشت جهانی یک ماده سرطان زا معرفی شده و سرطان پوست شایع ترین است (WHO, 2023). این عنصر در گیاهان تجمع و سمی است (Wang and Mulligan 2006). به دلیل سمیت بالا و خطر زیاد این عنصر، پالایش آب و خاک های آلوده برای حفاظت از محیط زیست و سلامت عمومی ضروری است. روش های پالایش خاک های آلوده به آرسنیک متنوع و شامل روش های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی است. هر کدام از این روش ها دارای محاسن و معایب خاص خود هستند؛ مثلاً روش های فیزیکی عموماً در آلودگی زیاد و در وسعت کم با هزینه زیاد قابل اجرا هستند. اگرچه روش اندود سازی خاک آلوده با خاک غیر آلوده ارزان تر از بقیه شیوه ها است اما این تکنیک نه برای اصلاح دائمی خاک بلکه برای منزوی نمودن مکان آلوده به کار می رود. همچنین موفقیت روش فیزیکی به نوع گونه عنصر آرسنیک در خاک

بستگی دارد (Naseri et al, 2014 Sepehr and Shiriazar, 2020). در زیست پالایی خاک آلوده به آرسنیک از برخی میکروارگانیسم های کارا استفاده می شود. این ریزجانداران آرسنیک را از طریق جذب زیستی در درون سلول های خود غیرمتحرک می کنند (Granchinho et al, 2001). برخی جلبک ها گونه شیمیایی سمی تر آرسنیت را به آرسنات کمتر سمی اکسید می کنند و یا ترکیبات آرسنیک از طریق تصعید از خاک خارج می گردند (Tamaki and Frankenberger, 1992). نیاز به کارشناس خبره، آزمایشگاه مدرن و هزینه زیاد از معایب پالایش زیستی به شمار می روند. در تکنیک گیاه پالایی از انواع گیاهان برای غیر متحرک سازی آرسنیک استفاده می شود. یکی از شروط موفقیت، انتخاب گیاهانی است که توانایی انباشت آرسنیک را در زیست توده خود داشته باشند، به عبارت دیگر بیش انباشتگر باشند. حداقل غلظت لازم برای اینکه گیاهی به عنوان بیش انباشتگر آرسنیک معرفی شود ۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم (۰/۱٪) در وزن خشک بیان شده است (Ma et al., 2001). از این گیاهان می توان به انواع سرخس ها، گیاه برنج و گل جعفری اشاره کرد (Mirzaei et al., 2014,a). اما برخی موارد همچون تولید زی توده کم، عمق کم ریشه، نیاز به زمان طولانی و محدود بودن این روش به عمق فعالیت ریشه گیاه در خاک، وسعت حوزه عمل تکنیک گیاه پالایی را محدود کرده است (Mirzaei et al., 2014,b).



شکل ۱- انواع روش‌های پالایش آرسنیک از خاک و رسوبات

Figure 1- Different methods of arsenic purification from soil and sediments (Mahimairaja et al., 2005)

کاهش خواهد یافت (Sepehr and Shiriazar, 2020)؛ مثلاً سطح ویژه ذرات آهن صفر یک عامل مهم در سرعت واکنش‌های مربوط به آن است و به همین دلیل محققان به دنبال تهیه و استفاده از نانو ذرات آهن صفر هستند اما هزینه‌ها هم با بهبود فناوری افزایش می‌یابد. همچنین همه جوانب استفاده از نانو ذرات در خاک هنوز مشخص نشده است (Naseri et al., 2014).

سپهر و شیرآذر (Sepehr and Shiriazar, 2020) ضمن مطالعه روش‌های گوناگون آلودگی‌زدایی آرسنیک از منابع آب و خاک چنین نتیجه گرفتند که در انتخاب نوع روش باید به هزینه کم، عدم تولید بقایای سمی و دوستدار محیط‌زیست بودن و عملیات اجرایی آسان توجه ویژه شود. به اعتقاد این محققان جاذب مناسب آرسنیک علاوه بر ظرفیت بالای جذب باید در طبیعت فراوان و ارزان باشد. برخی محققان معتقدند که بیوپچار واجد این شرایط است (Ahmad et al, 2014).

عموماً دو رهیافت اصلی برای پالایش شیمیایی خاک‌های آلوده به فلزات و شبه فلزاتی همچون آرسنیک ارائه شده است: الف) غیر متحرک‌سازی با استفاده از مواد آلی و غیر آلی و ب) متحرک‌سازی فلزات و حذف از طریق جذب توسط گیاه (گیاه‌پالایی) یا شستشوی خاک (Bolan et al., 2004). تاکنون مشخص شده است که در پالایش شیمیایی، اکسیدهای آهن و کانی ژئولیت موفق‌تر از بقیه کانی‌ها از جمله کربنات کلسیم عمل کرده‌اند (Naidu, 2006). از بین ترکیبات آهن، آهن صفر و دو ظرفیتی مورد استفاده قرار گرفته و گزارش شده است که با تشکیل هیدروکسیدهای آهن این مواد به‌عنوان جاذب گونه‌های آرسنیک عمل می‌کنند (Naseri et al., 2014). عموماً موفقیت روش‌های شیمیایی بستگی به سرعت واکنش‌های شیمیایی دارد که آن‌هم به مجموعه عوامل محیطی بستگی دارد و در صورت مهیا نبودن این شرایط کارایی فرایندهای شیمیایی به‌شدت

بیوچار ماده آلی نوظهور: یک تیر چند نشان

بر طبق تعریف موسسه بین‌المللی بیوچار (IBI)، بیوچار به مواد جامد مشتق شده از تبدیل ترموشیمیایی زیست‌توده اولیه در یک محیط با اکسیژن محدود گفته می‌شود (Ghodsad et al., 2021). این ماده با استفاده از فرایندهای مختلف گرما شیمیایی از بقایای محصولات کشاورزی، پسماند جامد شهری و کودهای دامی تولید می‌شود. اهداف کاربرد بیوچار در چهار بخش کلی بیان شده است:

الف) تولید و استفاده در کشاورزی جهت بهبود حاصلخیزی خاک

ب) ترسیب کربن در خاک،

ج) احیای اراضی تخریب یافته و

د) مدیریت آلودگی آب‌و‌خاک

رایج‌ترین فرایند گرماشیمیایی پیرولیز نامیده می‌شود. این فرایند به دو نوع آهسته و سریع تقسیم می‌شود ولی پیرولیز آهسته رایج‌ترین شیوه تولید بیوچار است (Tan et al., 2015). دمای پیرولیز (شکل ۲) در کنار نوع زیست‌توده از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر ویژگی‌های بیوچار تولیدی است (Reyhanitabar et al., 2014). ماهیت کربن بیوچار مقاوم و عمدتاً آروماتیک بوده و با مصرف آن در خاک کربن در خاک ترسیب و انتشار گازهای گلخانه‌ای کاهش پیدا می‌کند (Lehmann et al., 2006). امروزه علاوه بر بحث ترسیب کربن در تسویه پساب از فلزات سنگین نیز بیوچار مطرح است (شکل ۳) (Tan et al., 2015, Rajapaksha, 2016).

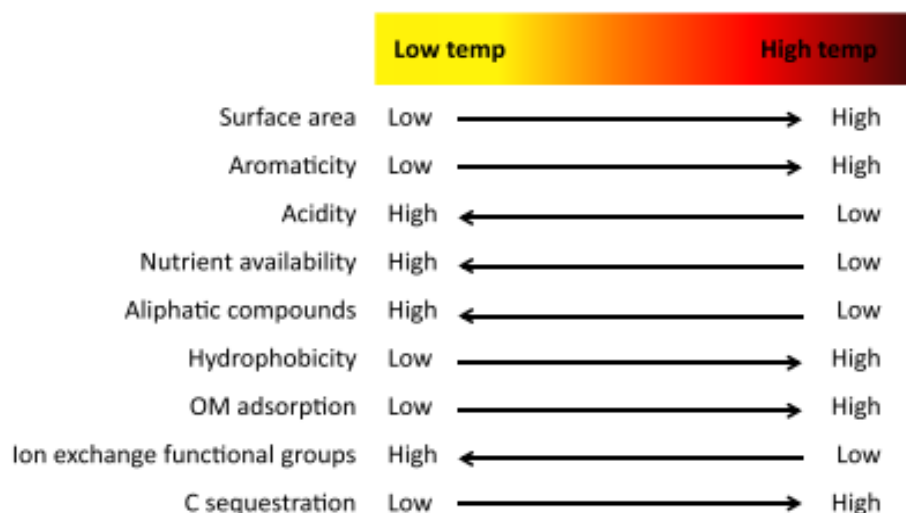
هدف مقاله

در دو دهه گذشته در مورد برهمکنش بیوچار و آرسنیک در سطح جهانی تحقیقات خوبی انجام گرفته و اکثراً نتایج امیدبخش بودند (Steiner et al., 2007, Zhang et al., 2022). به‌رغم این موضوع هنوز بسیاری

از جنبه‌های برهمکنش بیوچار با آرسنیک ناشناخته است. تنوع در ماهیت زیست‌توده اولیه و شرایط پیرولیز شاید دلیل اصلی نتایج متنوع باشند. مطالعات کمی در مورد غیرمتحرک کردن آرسنیک در محیط خاک نسبت به محیط‌های آبی انجام شده است؛ اما آنچه مسلم است علاقه به تحقیقات در مورد مکانیسم عمل بیوچار برای پالایش آرسنیک در آب‌و‌خاک‌های آلوده و توجه به جنبه‌های کاربردی در مقیاس مهندسی رو به افزایش است (Zhang et al., 2022). در زمینه ارزیابی و مقایسه تأثیر بیوچارهای مختلف در کاهش آلودگی آرسنیک در منابع آب‌و‌خاک در ایران اطلاعات بسیار اندک است، لذا با آگاهی از امکان استفاده از چنین ترکیبات دوستدار محیط‌زیست شاید بتوان راهکارهای مناسب و مؤثر و شرایط بهینه در این زمینه را که تاکنون ارائه شده است را بررسی کرد و در تحقیقات آتی بکار جست.

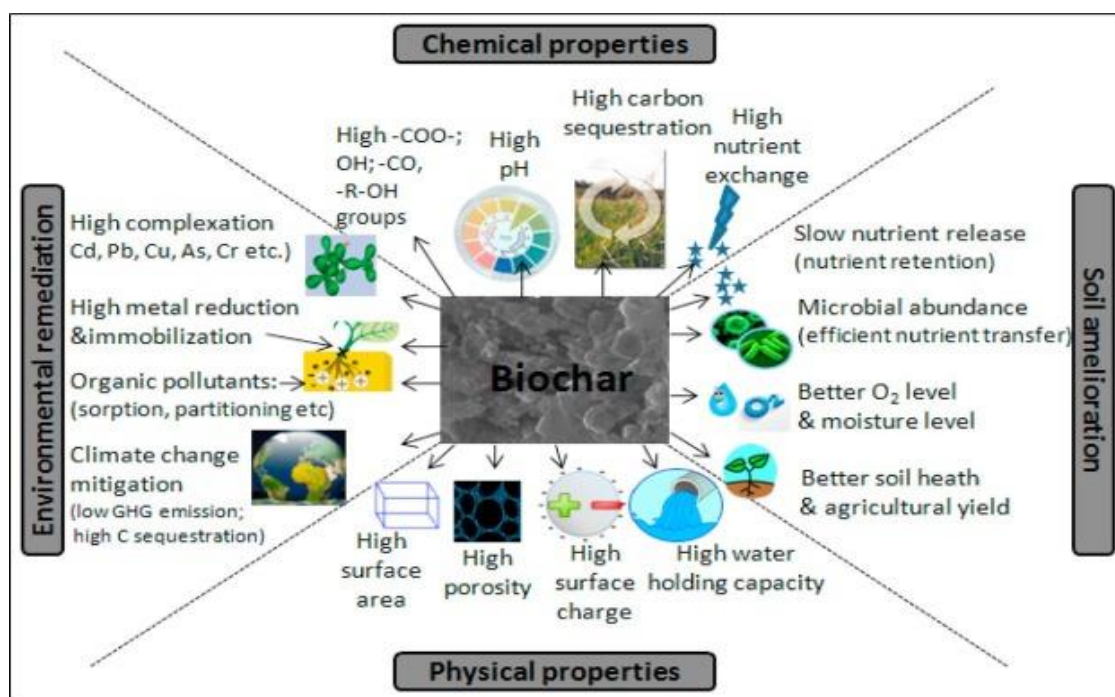
آمار آب‌و‌خاک‌های آلوده به آرسنیک و گستره آن در ایران

وضعیت آلودگی آب‌های سطحی و زیرسطحی در سیزده استان کشور نشان از جدی بودن تهدید آرسنیک برای سلامت مردم بوده و این امر تصفیه آب در این مناطق آلوده را الزام‌آور کرده است. کشور ایران به دلیل قرارگیری روی کمربند جهانی مس، به‌ویژه اهمیت نوار آتش‌فشانی ارومیه-دختر که از ارومیه تا جنوب شرق سیرجان کشیده شده است (شکل ۴)، خواستگاه مناسبی را در زمینه مطالعه روی کانسارهای مس پورفیری فراهم آورده است. در این راستا با توجه به اینکه پیریت و چالکوپریت از مهم‌ترین کانی‌های سولفیدی هستند که در کانسارهای مس پورفیری وجود دارند، از این‌رو آلودگی در مناطقی که معدنکاری مس پورفیری انجام می‌گیرد باید به‌دقت مورد بررسی قرار گیرد (Khadem M. Igdelou and Golchin, 2019).



شکل ۲- تأثیر دمای پیرولیز بر ویژگی‌ها و عملکرد بیوچار

Figure 2- The effects of pyrolysis temperature on the characteristics and yield of biochar (Lehmann et al., 2006)



شکل ۳- نمایش برخی کارکردهای بیوچار در خاک و محیط‌زیست

Figure 3- Some functions of biochar in soil and environment (Lehmann et al., 2006)



شکل ۴- کمربند آتش فشان‌های ارومیه-دختر و تأثیر آن بر آلودگی‌های آرسنیک تعدادی از استان‌های ایران
Figure 4- Urmia-Dokhtar volcanic belt and its effect on arsenic pollution in some provinces of Iran
(Khadem Igdellou and Golchin, 2019)

مناطق خشک و نیمه خشک (مکزیک، آرژانتین و آمریکا)؛ معدنکاری در مناطقی که حاوی کانی‌های سولفیدی است (آمریکا، چین و غنا) و منبع ژئوترمال در دنیا (شیلی، آمریکا، فرانسه و ژاپن). به نظر می‌رسد که آلودگی منابع آب ایران می‌تواند از هر چهار نوع باشد (Khadem.Igdellou and Golchin, 2019).

مطابق با گزارش‌های موجود، منابع آب‌های زیرزمینی و سطحی آلوده به آرسنیک در ایران در شکل ۵ ارائه شده است. از نظر توزیع جغرافیایی سفره‌های آبی آلوده به آرسنیک دنیا را به چهار دسته تقسیم می‌کنند که عبارت‌اند از حوضه‌های آبرفتی و دلتاها (بنگلادش، هند، نپال، تایوان، چین، ویتنام و مجارستان)؛ حوضه‌های بسته



شکل ۵- توزیع نقاطی با آب آلوده به آرسنیک در ایران (دوایر سبز رنگ) به تفکیک استان‌های آلوده به آرسنیک
Figure 5- Distribution of points with arsenic-contaminated water in Iran (green circles) by separating arsenic-contaminated provinces (Khadem.Igdellou and Golchin, 2019)

شده است شکل (۶). علاوه بر این، خاک‌های آهکی این منطقه که حاوی بیکربنات نیز هستند، موجب آزادسازی آرسنیک از کانی‌های سولفات به آب‌های زیرزمینی شده است (Nadiri et al., 2012).

منابع آب و خاک استان آذربایجان شرقی به‌ویژه شهرستان هشترود آلوده به آرسنیک گزارش شده‌اند. آلودگی آب‌های زیرزمینی و سطحی به‌ویژه مخزن ۱۳۵ میلیون مترمکعبی سد سهند که تأمین‌کننده آب شرب، صنعتی و کشاورزی منطقه است، باعث نگرانی در منطقه



شکل ۶- وجود آرسنیک در خاک‌های شهرستان هشترود (a) و سولفیدهای آرسنیک در خاک‌های مارنی (b)
Figure 6- Presence of arsenic in the soils of Hashtrud County in East Azarbaijan province, North West of Iran (a) and arsenic sulfides in marl soils (b) (Nadiri et al., 2012.)

انگلستان، آلمان، لهستان، کانادا و استرالیا به ترتیب ۲۰، ۴۰، ۳۰، ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم تعیین شده است (Pais and Jones, 1997). مطابق با داده‌های جدول (۱) بیشتر آلودگی خاک‌های ایران به آرسنیک در اطراف معادن استخراج فلز قرار دارند (معادن مس سرچشمه کرمان و معدن آی‌قلعه‌سی آذربایجان غربی) و همه استان‌های نام‌برده شده در جدول (۱) بر روی سازند حاوی فلزات سنگین واقع شده‌اند.

مطالعات مختلفی بالاترین غلظت مجاز آرسنیک در خاک را از ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در خاک‌های لومی تا ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در خاک‌های شنی عنوان کرده‌اند. متوسط مقدار آرسنیک در خاک‌های جهان ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شده است. لذا غلظت آرسنیک در خاک‌های غیر آلوده به‌ندرت از این عدد تجاوز می‌کند (جدول ۱). در حالی است که مقدار طبیعی آن در خاک‌ها حدود ۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم اعلام شده است. حداکثر غلظت مجاز آرسنیک کل در خاک‌های کشاورزی در کشورهای

جدول ۱- غلظت آرسنیک کل در نمونه‌های خاک از مناطق مختلف ایران
Table 1- Total arsenic concentration in soil samples from different regions of Iran
(Khadem M. Igdelou and Golchin, 2019)

استان	شهرستان	محل	غلظت آرسنیک
آذربایجان شرقی	هشترود	قوپوز	189.91
آذربایجان غربی	تکاب	امتداد رگه اصلی معدن آی قلعه سی	481.9
زنجان	ماهنشان	خابینک	71.68
کردستان	بیجار	گونداک	1665.2
کردستان	قروه	بخش شمالی قروه	990
خراسان رضوی	کاشمر	چلیو	204.6
کرمان	کرمان	مس سرچشمه	104

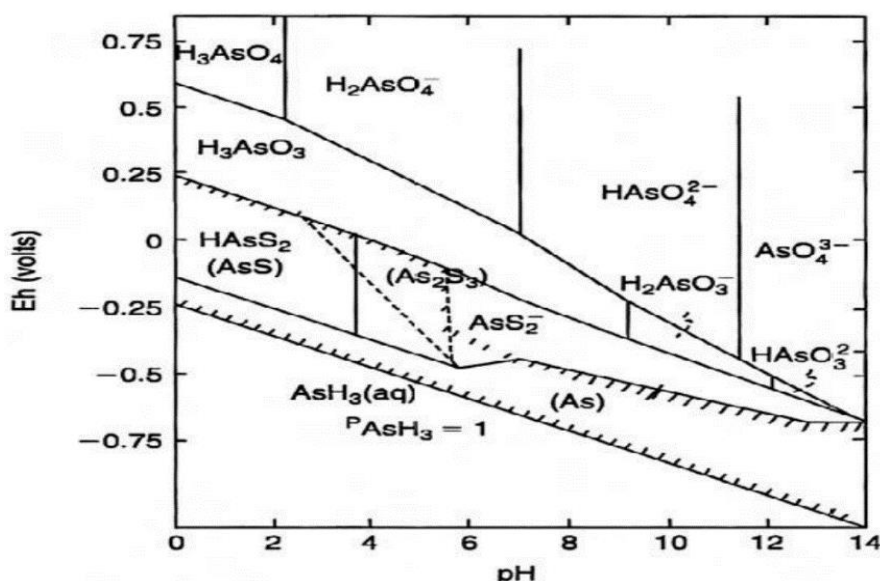
منابع آرسنیک

آرسنیک از پوسته زمین در اثر فرایندهای طبیعی و در اثر فعالیت‌های صنعتی انسانی وارد محیط زیست می‌شود. مهم‌ترین کانی‌های آرسنیک شامل آرسنو پیریت (FeAsS)، او پیمان یا زرنیخ زرد (As_2S_3)، رآلگاریا زرنیخ قرمز (AsS)، آرسنولایت (As_2O_3) و برخی ترکیبات بی‌شکل می‌باشند (Smedley and Kinniburgh, 2002).

شکل‌های آرسنیک در خاک

آرسنیک در خاک به دو شکل آلی و معدنی یافت می‌شود. میکروارگانیزم‌های خاک معمولاً اکسایش، کاهش، متیل و دی متیل کردن آرسنیک در خاک‌ها را انجام می‌دهند. در شرایط اکسیدی گونه‌های معدنی آرسنیک ممکن است

با متیل واکنش و ترکیب‌های متیل‌دار تشکیل دهند (Mandal and Suzuki, 2002). شکل‌های معدنی آرسنیک در خاک شامل اکسی آنیون‌هایی هستند که دارای بار منفی هستند. آرسنیک در خاک در چهار مرحله اکسایشی $5-$ ، $3,0-$ و $3+$ یافت می‌شود که البته $3-$ و $5-$ ظرفیتی‌ها مهم هستند. در pH دو تا نه فراوان‌ترین گونه‌های آرسنیک در خاک عبارت‌اند از H_2AsO_4^- و HAsO_4^{2-} برای آرسنات‌ها و H_3AsO_3 برای آرسنیت‌ها (شکل ۴) (Escobar and Monhemius, 1988). آرسنات قوی‌تر از آرسنیت در سطح کلئیدهای خاک جذب می‌شود و آرسنیت سمیت و تحرک بیشتری نسبت به آرسنات دارد (Pierce and Moore, 1982).



شکل ۴- تأثیر پتانسیل ریداکس (Eh) و pH بر گونه‌های آرسنیک در خاک
Figure 4- The effects of redox potential (Eh) and pH on species of arsenic in soil
(Escobar and Monhemius, 1988)

واکنش‌های آرسنیک در خاک

غلظت آرسنیک محلول خاک تحت تأثیر فرایندهای شیمیایی مختلف و ویژگی‌های خاک است. برخی از واکنش‌های مهم عبارت‌اند از واکنش‌های متیل‌دار شدن و تصعید، واکنش‌های میکروبی، واکنش‌های حل شدن و رسوب، واکنش‌های اکسایش - کاهش و واکنش‌های

جذب و واجذب در سطوح مختلف کانی‌ها. واکنش‌های متیل‌دار شدن شامل جایگزینی گروه‌های متیل ($-\text{CH}_3$) به سایر ملکول‌ها می‌باشد. ترکیب‌های آرسنیک متیل‌دار شده در خاک شامل منو متیل آرسنیک اسید، دی متیل آرسنیک اسید، تری متیل آرسنیک و متیل آرسین‌ها هستند. البته ترکیبات آرسین تمایل به تصعید و فرار به اتمسفر دارند

عوامل مؤثر بر جذب- و اجذب آرسنیک در خاک

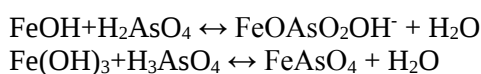
کمیت و ماهیت رس‌های خاک، اکسی هیدروکسیدهای آهن، کمیت و ماهیت کربنات‌ها، مواد آلی، pH خاک و غلظت آنیون‌های رقیب از مهم‌ترین عامل‌های مؤثر بر جذب و واجذب آرسنیک در خاک‌ها هستند (Sepehr and Shiriazar, 2020, Zhang et al., 2015).

الف- کانی‌های رس

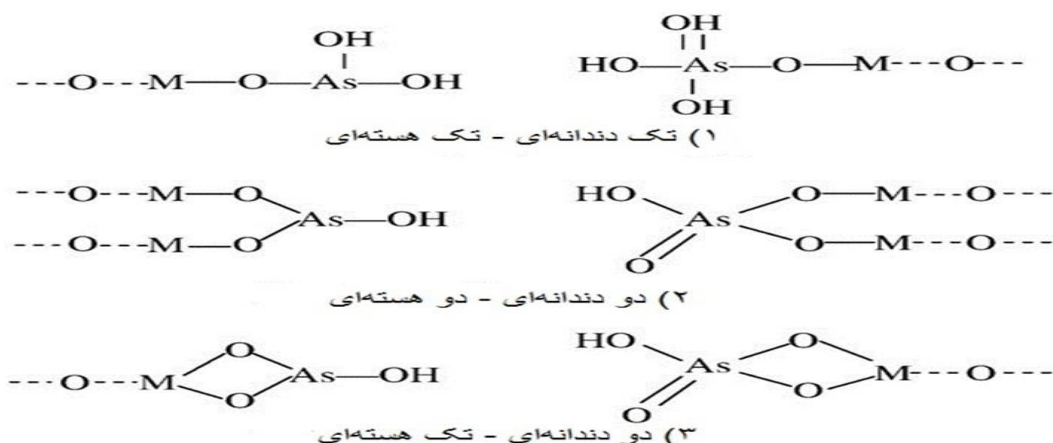
جذب اکسی آنیون‌های آرسنیک توسط جذب شیمیایی و تبادل یونی در سطوح رس‌ها به‌طور عمده توسط جانشینی هم‌شکل یا رقابت با فسفات رخ می‌دهد (Goldberg and Glaubig, 1988). اصولاً تحرک آرسنیک در خاک‌های سبک بافت بیشتر از خاک‌های رسی است. خصوصیات بار سطحی خاک‌ها تحت تأثیر pH قرار می‌گیرد، لذا در خاک‌های اسیدی مقدار جذب آنیون‌هایی مانند H_2AsO_4 می‌تواند قابل توجه باشد (Brookins, 1988).

ب) اکسی هیدروکسیدهای آهن

جذب آرسنات در اکسیدهای آهن معمولاً با کاهش pH افزایش می‌یابد و به‌سرعت در pH بالای هشت کاهش می‌یابد. جذب آرسنیت در اکسیدهای آهن بیشتر در دامنه pH بین شش تا هشت اتفاق می‌افتد. تحت شرایط هوازی، اکسیدهای آهن تقریباً غیرقابل حل بوده و عاملی برای رسوب آرسنیک محسوب می‌شوند؛ اما در pH و Eh پایین با انحلال اکسیدهای فلزی تحرک آرسنیک هم افزایش می‌یابد. با انحلال اکسیدهای فلزی تحرک آرسنیک هم افزایش می‌یابد. نگهداشت آرسنیک از طریق تشکیل ترکیبات درون کره‌ای با جاذب‌ها از طریق مکانیسم تبادل یونی انجام می‌شود. واکنش‌های محتمل جذب آرسنیک توسط اکسید و هیدروکسیدهای آهن عبارت‌اند از (Maning and Goldberg, 1997):



(Yan-Chu, 1994). میکروارگانیزم‌های خاک در بیشتر واکنش‌های اکسایش و کاهش نقش دارند و به‌عنوان کاتالیز عمل می‌کنند. از این‌رو فعالیت میکروبی می‌تواند به احیای $As(v)$ به $As(III)$ منجر شود که موجب تحرک As می‌شود. در شالیزارها رهاسازی آرسنیک با واکنش‌پذیری ریداکس اکسید آهن در ارتباط است (Yamamura and Amachi, 2014). در اراضی غرقاب پس از زهکشی، تحرک $As(v)$ به دلیل جذب توسط (هیدرو) اکسید $Fe(III)$ محدود می‌شود. در شرایط اکسیدی دو کانی آرسنات کلسیم و آرسنات منگنز شکل غالب آرسنیک در خاک قلیایی و در خاک‌های اسیدی هم کانی‌های آرسنات آهن و آلومینیوم پایدارتر هستند (Sadig, 1997). دو پارامتر pH و Eh بر گونه‌بندی آرسنیک در محلول خاک اثرگذار هستند. در سطوح بالای Eh خاک (pe+pH از ۱۰ تا ۱۸ یا Eh از ۲۰۰ تا ۵۰۰ میلی ولت) آرسنات گونه غالب است. در خاک‌های قلیایی، با کاهش (احیای) آرسنات به آرسنیت، مقدار قابل‌توجهی آرسنیک در خاک رها می‌شود. در شرایط کاهشی متوسط خاک (pe+pH از هفت تا نه یا Eh از صفر تا ۱۰۰ میلی ولت)، تحرک آرسنیک به‌وسیله حل شدن اکسی هیدروکسیدهای آهن کنترل می‌شود (Al-Abed et al., 2007, Mahimairaja et al., 2005). تراکم زیاد بار سطحی مثبت در شرایط pH کمتر از نقطه صفر بار الکتریکی (ZPC) کانی‌های خاک را مستعد جذب آرسنات می‌سازد. اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن، آلومینیوم و منگنز از کانی‌های جاذب آرسنیک هستند. آرسنیت و آرسنات می‌توانند به‌صورت جذب اختصاصی در سطح کانی‌های رس و اکسیدهای فلزی از طریق تبادل لیگاندی با گروه‌های عاملی OH و OH_2^+ جذب شوند. آرسنیت می‌تواند به‌صورت غیراختصاصی و با نیروهای الکترواستاتیک در سطوح هیدروکسیدهای آلومینیوم جذب شود (Wang, 2006).



شکل ۵- انواع مکانیسم‌های جذب آرسنیک بر سطح غیرمتحرک‌کننده

Figure 5- Types of As adsorption mechanisms on immobilizing surface (Sun and Doner 1996)

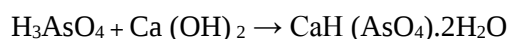
می‌شوند که این جذب به pH و میزان اسید هیومیک وابسته است (Thanabalasingam and Pickering, 1986). برای آرسنات حداکثر جذب سطحی در pH 5.5 اتفاق می‌افتد.

و) pH خاک

pH خاک در جذب آرسنیک مهم است و معمولاً با کاهش pH جذب افزایش می‌یابد (Hingston et al., 1971). حداکثر جذب آرسنات در کانی‌های رس در pH بین چهار تا شش گزارش شده است. حداکثر جذب آرسنات برای کائولینیت در pH 5، مونتموریلونیت ۶ و ایلات ۶/۵ گزارش شده است (Manning and Goldberg, 1966).

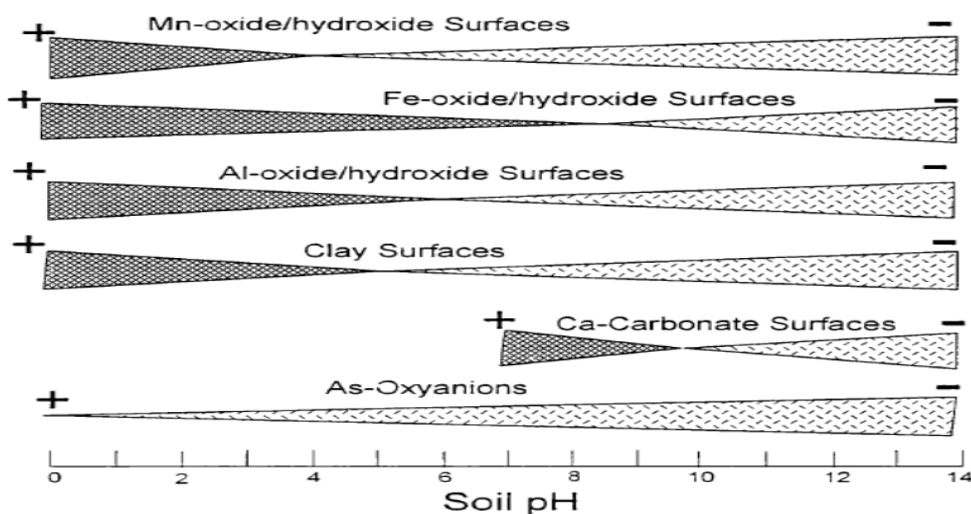
ج) کانی‌های کربنات

کربنات‌ها نقش مهمی در جذب آرسنات در خاک‌های آهکی در pH بین ۹ تا ۱۲ بازی می‌کنند (Golderberg and Glaubig, 1988). مصرف آهک در خاک‌های اسیدی باعث کاهش تحرک و آبشویی آرسنیک از طریق تشکیل آرسنات کلسیم با واکنش زیر می‌شود (Stefanakis and Koutopoulos, 1988):



د) ماده آلی

به دلیل شباهت بار الکتریکی مواد آلی خاک و اکسی آنیون‌های آرسنیک انتظار برهمکنش محدودی می‌رود. آرسنات و آرسنیت توسط اسیدهای هیومیک جذب



شکل ۴- توزیع بار الکتریکی در اجزای مختلف خاک

Figure 4- Electric charge distribution in different soil components (Sadiq, 1997)

ه) تأثیر یون رقیب

تحرک آرسنیک در خاک‌ها به‌طور قابل‌توجهی توسط آنیون‌های رقیب مانند کربنات، سولفات، فسفات و کلراید تحت تأثیر قرار می‌گیرد. تأثیر فسفات بر جذب آرسنات بستگی به محتوای اکسیدهای آهن دارد اما در کل رفتار شیمیایی آرسنات شبیه فسفات است. مکانیسم جذب هر دو توسط اکسیدهای آهن درون کره‌ای اعلام‌شده است و رقابت سولفات و اهمیت این یون رقیب ضعیف‌تر از فسفات است (Lumsdon et al., 1984).

بررسی اجمالی تحقیقات مرتبط با برهمکنش بیوچار و آرسنیک

از دهه ۱۹۸۰ میلادی به این طرف تعداد مقالات منتشرشده مرتبط با بیوچار و آرسنیک روند افزایشی داشته (Steiner et al., 2007) و در دو دهه گذشته آزمایش‌های متعددی جهت بررسی اثربخشی بیوچار جهت غیرمتحرک کردن آرسنیک در خاک انجام شده است (Qiu et al., 2024). با این حال تعداد مقالات منتشرشده در مورد پالایش خاک کمتر از محیط‌های آبی است.

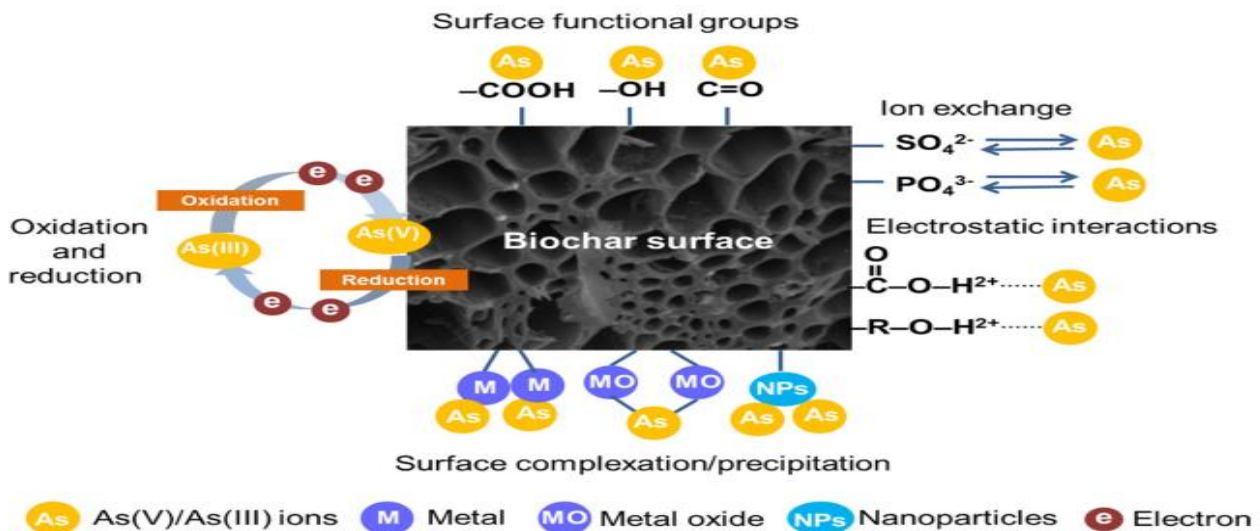
الف) استفاده از بیوچار برای پالایش آرسنیک از آب

برای حذف آرسنیک از آب آلوده بیوچارهای تهیه‌شده از انواع مختلف مواد اولیه از قبیل بیوچارهای چوبی و علفی و جامدات زیستی استفاده شده است. پالایش هر دو گونه $As(III)$ و $As(V)$ در محلول‌های آبی با استفاده از بیوچار موفق ارزیابی‌شده است (Samsuri et al., 2013). راندمان حذف $As(III)$ از محلول‌های آبی توسط بیوچار تهیه شده از چوب مخروط کاج و بیوچار همراه عنصر روی (Zn) بارگیری شده روی آن به ترتیب ۶۶ و ۸۸ درصد گزارش شده است (VanVinh et al., 2015). بیوچار تولیدشده از لجن فاضلاب در حذف

$As(V)$ از آب موفق بود (Agrafioti et al., 2014)؛ اما اکثر محققان تنها بر راندمان حذف گونه‌های آرسنیک در سامانه‌های تک یونی متمرکز شده‌اند. تعداد محدودی از مطالعات در سامانه‌های دوتایی انجام شده است (Samsuri et al., 2013). همچنین مطالعات منتشرشده برای بررسی برهمکنش بیوچار با گونه‌های مختلف آرسنیک محدود است.

عوامل مؤثر در غیرمتحرک کردن آرسنیک توسط بیوچار

ویژگی‌های بار سطحی بیوچار و گونه‌بندی آرسنیک تابع pH محیط است. گروه‌های عاملی مختلف همچون آمین‌ها، الکل، کربوکسیل و ... در سطح بیوچار بسته به pH محلول تمایل به پروتونه شدن دارند و در نتیجه بار سطح بیوچار را تغییر می‌دهند. pH محلول بر گونه‌بندی آرسنیک به شکل‌های مختلف همچون $H_2AsO_4^-$ ، AsO_4^{3-} و H_3AsO_4 ، $HAAsO_4^{2-}$ ، به دلیل تأثیرپذیری گونه‌های آرسنیک از pH محیط مکانیسم جذب آن‌ها متنوع است. پتانسیل ریداکس از عوامل کلیدی مؤثر در برهمکنش آرسنیک و سطح بیوچار است (Rinklebe et al., 2016, Amen et al., 2020). گونه‌های فعال ریداکس مانند $[NO_3, MnO_2, MnOOH, FeO(OH)]$ که با سطح بیوچار در تماس هستند می‌توانند $As(III)$ با تحرک بیشتر را به گونه با تحرک کمتر $As(V)$ تبدیل کنند (Rinklebe et al., 2016). عنصر آهن در بیوچار می‌تواند به شکل‌های اکسید آهن ($Fe_2O_3, Fe_3O_4, FeOOH$) بسته به شرایط پیرولیز حضور داشته باشد. به عنوان مثال مقدار آهن در بیوچار حاصل از جامدات زیستی تا ۲/۳ درصد کل وزن بیوچار گزارش شده است (Vithang et al., 2017, Reyhanitabar et al., 2020). کمیت و کیفیت آهن در غیرمتحرک کردن آرسنیک مهم است.

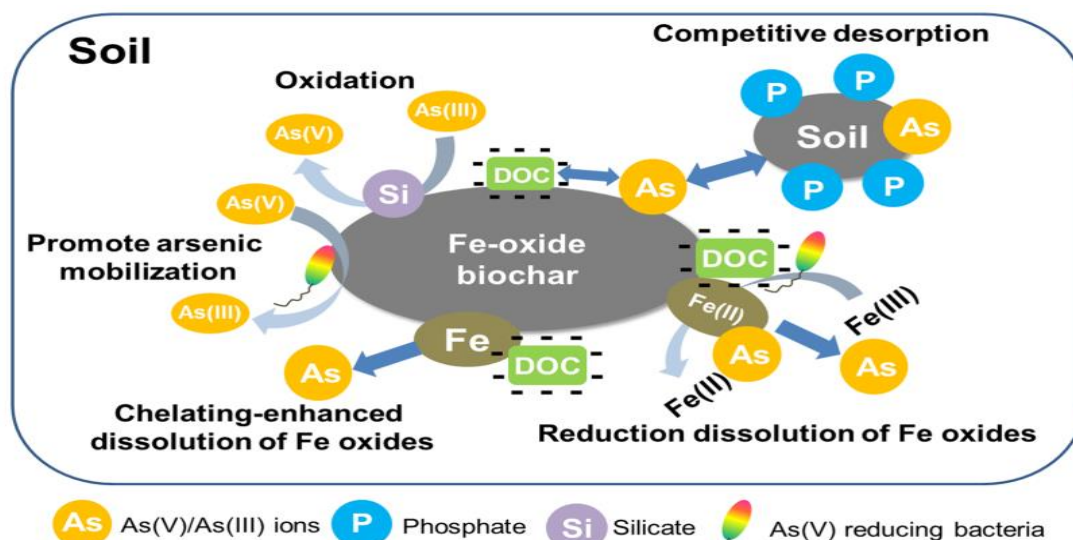


شکل ۷- نمایش برخی سازوکارهای جذب آرسنیک از آب آلوده توسط بیوچار

Figure 7- Some mechanisms of as sorption by biochar from contaminated water (Vithang et al., 2017)

حجم منافذ ممکن است آرسنیک را به داخل منافذ بیوچار منتشر کند. گروه‌های عاملی در سطح بیوچار می‌توانند از طریق پروتون‌دهی و پروتون‌گیری با مواد بار الکتریکی کسب کنند. بر طبق واکنش زیرگروه‌های آمین می‌توانند در pH های اسیدی پروتون دهی کنند و باعث جذب الکترواستاتیک گونه‌های منفی بار آرسنات شوند (Tytlak et al, 2015).

اصلاح بیوچار برای جذب آرسنیک در خاک‌های آلوده یکی از شیوه‌های اصلاح بیوچار، پوشش دادن سطح آن با آهن صفر بار، نمک‌های منگنز یا برخی دیگر از مواد معدنی است (Zhang et al., 2013). اصلاح بیوچار با محلول KOH باعث افزایش سطح ویژه و حجم منافذ شده است. افزایش سطح ویژه و

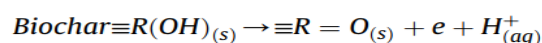
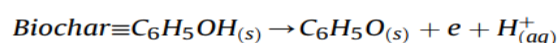
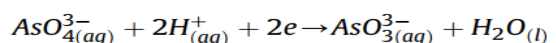


شکل ۸- نمایش عوامل مؤثر بر حذف آرسنیک از خاک توسط بیوچار حاوی اکسید آهن (کربن آلی محلول (DOC)، فسفات، سیلیکات و فعالیت میکروبی)

Figure 8- Showing the effective factors on removing As from soil by biochar containing iron oxide (dissolved organic carbon (DOC), phosphate, silicate and microbial activity) (Zhang et al., 2022)

ارتباط ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک با کارایی
بیوچار در خاک آلوده به آرسنیک

ویژگی‌های خاک همچون مقادیر کربن آلی
محلول (DOC)، غلظت عناصری همچون کلسیم، منیزیم،
پتاسیم و سولفات در عملکرد بیوچار در خاک مؤثرند. مواد
آلی و گروه‌های عاملی مختلف می‌توانند با اهدای الکترون
در واکنش‌های احیا (کاهش) دخالت کنند (Choppa et al., 2016, Aftabtalab et al., 2022).

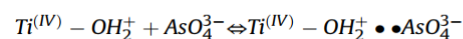
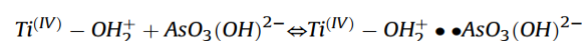
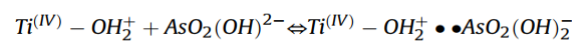
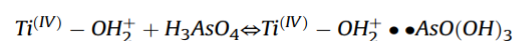


این واکنش‌ها به صورت طبیعی در خاک مخلوط
شده با بیوچار رخ می‌دهند و بر تحرک گونه‌های آرسنیک
اثراگذار هستند. اگر فرایند پیرولیز در دمای بالا انجام شود
pH بیوچارهای تولیدی افزایش یافته و ممکن است pH
خاک دریافت‌کننده هم افزایش یابد. نتیجه این عمل کاهش
بار مثبت خاک و در نتیجه کاهش جذب آنیون آرسنیک
است؛ اما در همین وضعیت هدایت الکتریکی زیاد خاک
ممکن است با افزایش غلظت کاتیون‌ها منجر به رسوب
آرسنیک شود (Liang et al., 2006). بیسلی و همکاران
(Beesley et al., 2014) گزارش کردند که بیوچار
تهیه‌شده از بقایای هرس درختان آلو، مقدار ماده آلی خاک
و تحرک As(v) را افزایش داد. برهمکنش آرسنیک با
فسفات حائز اهمیت است. قدس‌زاد و همکاران
(Ghodszad et al., 2020) گزارش کردند که بیوچار منبع
خوبی برای آزادسازی فسفر به خاک است. در آب فوسفات
تحرک As(v) را کاهش داد اما در خاک زیست‌فراهمی آن
را افزایش داد (Bolan et al., 2013). از این رو روشن است
که برهمکنش As-P وابسته به سیستم محیط و همچنین
غلظت‌های موجود As و P است (Meharg and Hartley-Whitaker, 2002).

اطلاعات در مورد پدیده مسن شدن بیوچار در
خاک کم است، اما تصور بر این است که گذشت زمان،

ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2022) در
توصیف عوامل مؤثر بر جذب آرسنیک از خاک توسط
بیوچار، گزارش کردند که غلظت کربن آلی محلول به عنوان
متحرک‌ترین لیگاند آلی یک عامل کلیدی است. همچنین
بار منفی آن همانند فسفات و سولفات منفی بار نقش مهمی
در واجذب آرسنات داشته و لذا از عوامل مهم به حساب
می‌آیند (شکل ۸).

در برخی موارد بیوچار با دی‌اکسید تیتانیوم
به عنوان یک کاتالیست آغشته می‌شود که این کار باعث
جذب آرسنیک می‌شود. مکانیسم‌های مفروض به شرح زیر
ارائه شده‌اند (Dutta et al., 2004):



شیری‌آذر و همکاران (Shiriazar et al., 2020).
گزارش کردند که اصلاح بیوچار حاصل از بقایای
هرس درختان سیب پیرولیز شده در دمای ۳۰۰ درجه
سلسیوس با نمک آهن به علت داشتن قابلیت دسترسی
منطقه‌ای و کاربرد آسان می‌تواند به عنوان یک جاذب
ارزان قیمت برای رفع آلاینده‌های آرسنات از آب مطرح شود.
این محققان بیان کردند که نمک آهن ویژگی‌های سطح
بیوچار را تغییر داد و باعث ایجاد ترکیبات گرانوله شکل در
سطح جاذب شد. این پژوهشگران همچنین گزارش کردند
که فرایند جذب برای بیوچار اصلاح‌نشده از نوع فیزیکی و
برای بیوچارهای اصلاح‌شده از نوع شیمیایی بود. بر طبق
مقدار انرژی آزاد گیبس این محققان نتیجه گرفتند که فرایند
جذب آرسنات توسط بیوچار خودبه‌خودی است (Shiriazar et al., 2020).

میزان بار سطحی بیوچار را تغییر خواهد داد؛ اما نتایج اندک مطالعات منتشر شده ضدونقیض است. برخی محققان گزارش کرده‌اند که پیری بیوچار در خاک، بار سطحی را افزایش نداد (Nagodavithan, 2014) و برخی دیگر افزایش بار سطحی را گزارش کرده‌اند (Cheng et al., 2009). اخیراً کیو و همکاران (Qiu et al., 2024) گزارش کردند که مسن شدن بیوچار در خاک باعث متحرک شدن دوباره عنصر سرب (Pb) ولی تثبیت محکم آرسنیک (As) در خاک شد. بیوچار مورد استفاده این محققان از پیرولیز مشترک کود دامی (خوک) و علف هفت‌بند ژاپنی تهیه شده بود. همچنین آنان اعلام کردند که گذشت زمان و پدیده مسن شدن بیوچار تأثیر بیوچار بر pH و غلظت ماده آلی محلول (DOM) را کاهش اما قابلیت هدایت الکتریکی خاک را افزایش داد. در نهایت این پژوهشگران چنین نتیجه گرفتند که تأثیر بیوچار مصرفی بر شیمی سرب و آرسنیک در یک خاک‌آلوده به این دو عنصر کاملاً متفاوت بود. (Qiu et al., 2024).

نقش بیوچار بر زیست‌فراهمی آرسنیک در خاک‌آلوده

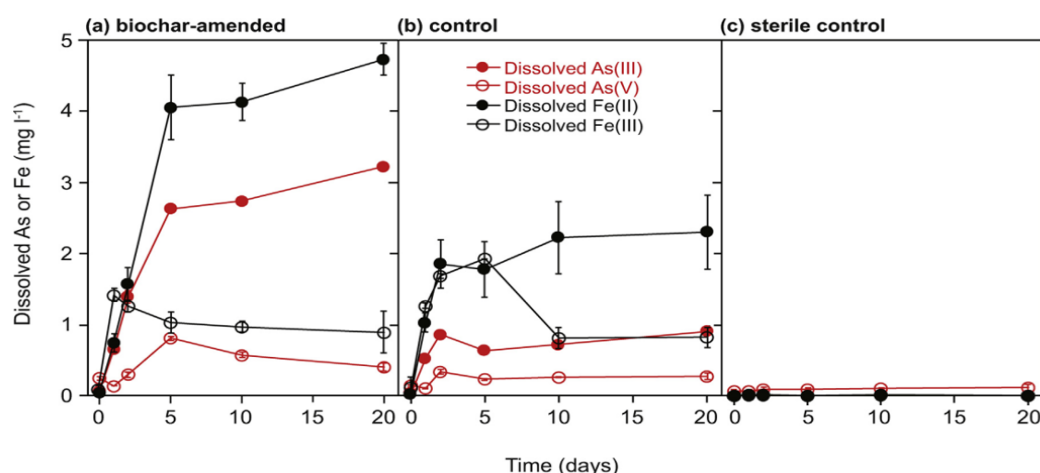
در یک خاک اسیدی آلوده به آرسنیک مصرف بیوچار باعث افزایش غلظت آرسنیک در آب منفذی شد، اما غلظت آرسنیک در ریشه و بخش هوایی گیاه گوجه‌فرنگی کاهش معنادار یافت. همچنین غلظت آرسنیک در میوه‌ها کمتر از سه میکروگرم در کیلوگرم بود (Beesley et al., 2013). در یک خاک غنی از آرسنیک به علت استفاده طولانی مدت از آفت‌کش‌ها، زیست‌فراهمی As برای استخراج گیاهی توسط *Lolium perenne* L. مورد بررسی قرار گرفت (Gregory et al., 2014). محققان گزارش کردند که زیست‌فراهمی As با بیوچار تولیدشده در دمای پایین (۳۵۰ درجه سلسیوس) کمتر از بیوچار تولیدشده در دماهای بالا (۶۵۰ درجه سانتی‌گراد) بود (کاهش در زیست‌فراهمی آرسنیک به ترتیب ۱۰۰ و ۷۰ درصد در مقایسه با شاهد بود). مقدار آرسنیک عصاره‌گیری شده با آب می‌تواند به دلیل رسوب با کاتیون‌های فلزی، مانند Ca^{2+} به صورت موقت کاهش یابد. با این حال، آن‌ها

ممکن است به راحتی مجدداً حل و As دوباره به محلول‌های آب رها شود. (Gregory et al., 2014) در مطالعه با گیاه چاودار، هنگامی که میزان مصرف بیوچار از ۳۰ تا ۶۰ درصد افزایش یافت، غلظت As در شاخساره افزایش یافت که نشان می‌دهد میزان مصرف بیشتر برای افزایش استخراج سبز آرسنیک در خاک مناسب است (Dixit and Herring, 2003). کاربرد بیوچار تولیدشده از بقایای باغ آلو به عنوان یک اصلاح‌کننده خاک در خاک معدن آلوده به آرسنیک، غلظت As در آب منافذ را افزایش داد و انباشت As در ریشه‌ها و بخش هوایی گیاهان گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum* L.) پرورش‌یافته در خاک معدن را کاهش داد (Beesley et al., 2013). این مشاهدات نشان داد که کمپلکس‌های As-DOC محلول و متحرک تشکیل، اما قادر به توضیح انتشار در بافت‌های گیاهان گوجه‌فرنگی نبود. انباشت آرسنیک در میوه‌های گوجه‌فرنگی به دلیل کاهش زیست‌فراهمی آرسنیک در خاک معدن تیمار شده با بیوچار پایین بود (Beesley et al., 2013). مقادیر فسفر و آهن در خاک می‌تواند با افزودن بیوچار به بیش از ۲۰ برابر افزایش یابد (Beesley et al., 2013). ساختار ماکرو، میکرو و نانو منافذ سطوح بیوچار می‌تواند احیای گونه‌های Fe و Mn موجود در خاک را تسهیل کند (Joseph et al., 2010) که باعث مقدار Eh منفی می‌شود. شرایط Eh منفی، کاهش گونه‌های As (V) به As (III) را افزایش می‌دهد که به آسانی در خاک جذب نمی‌شود و تحت پتانسیل ریداکس منفی، گونه‌های آرسنیک تحرک بیشتری در خاک دارند. (Moreno-Jiménez et al., 2012).

در تحقیقات دیگری هم گزارش شد که کاربرد برخی انواع بیوچار در خاک‌آلوده به آرسنیک تحرک این شبه‌فلز را افزایش داد. لذا برخی محققان پیشنهاد کردند که از این نوع بیوچارها همراه با تکنیک گیاه‌پالایی برای رفع آلودگی خاک‌آلوده به آرسنیک استفاده شود. (Choppala et al., 2016).

به دلیل عرضه عناصر غذایی و دارا بودن کربن لبایل، بیوچار می‌تواند فعالیت میکروبی را در خاک افزایش دهد.

بیوچار و شاخص‌های زیستی در خاک‌های آلوده به آرسنیک



شکل ۹- غلظت As (III) / As (V) محلول و $\text{Fe (II) / Fe (III)}$ محلول از خاک‌های غرقاب در تیمارهای مختلف در طول دوره انکوباسیون در (a) - ریزجهان‌های اصلاح‌شده با بیوچار (b) شاهد (ریزجهان‌های بدون بیوچار) و (c) شاهد استریل. میله‌ها خطاهای استاندارد را نشان می‌دهند

Figure 9- Concentration of dissolved As (III) / As (V) and dissolved Fe (II) / Fe (III) from waterlogged soils in different treatments during the incubation period in (a) - microcosms amended with biochar (b) control microcosm without biochar) and (c) sterile control. Bars indicate standard errors (Ohtsuka et al., 2013)

عمل کند (Lehmann et al., 2011). چنین منبع انرژی به‌راحتی در دسترس می‌تواند فعالیت‌های میکروبی و در نتیجه فعالیت آنزیم دهیدروژناز خاک را افزایش دهد. در مطالعاتی که در مورد گونه‌بندی و احیای As (V) در رسوبات معدن آبی آلوده به آرسنیک و اصلاح‌شده با بیوچار انجام شد، گزارش شد که جمعیت باکتری‌های کاهش‌دهنده As (V) ، ژئوباکتر^۱، آنارومیکسوباکتر^۲، دسولفوسپوروسینوس^۳ و پدوباکتر^۴، بعد از افزودن بیوچار افزایش یافت و مشارکت باکتری-بیوچار باعث احیای As (V) به As (III) و افزایش غلظت مواد آلی محلول در رسوبات معدن اصلاح‌شده با بیوچار شد (Chen et al., 2016). گزارش شده است که پس از افزودن بیوچار به خاک آلوده برای پالایش آرسنیک در آزمایش ستونی، غلظت آرسنیک محلول کاهش نیافت. در مقابل، افزایش قابل توجهی در رهاسازی آرسنیک در هنگام استفاده از بیوچار به رسوبات یا خاک شالیزاری آلوده مشاهده شد. افزایش

فعالیت میکروبی هم بر پتانسیل ریداکس و گونه‌بندی آرسنیک اثرگذار است. گزارش شده است که بیوچار می‌تواند باعث احیای As(v) به As(III) و آزاد شدن Fe(II) در محلول خاک شود (Zhang et al., 2014). همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود احیای آهن سه‌ظرفیتی در خاک شالیزار توسط بیوچار تحریک شده است. انحلال آرسنیک هم شبیه آهن تحت تأثیر بیوچار قرار می‌گیرد.

معمولاً فعالیت آنزیم دهیدروژناز (DHA) به‌عنوان شاخص فعالیت میکروبی محیط در نظر گرفته می‌شود. در یک مطالعه افزودن بیوچار پیرولیز شده در هر دو دمای پایین و بالا باعث افزایش فعالیت آنزیم دهیدروژناز نسبت به شاهد شد (Dixit and Herring, 2003). بخش لبایل کربن (C) که در بیوچار تولید شده در دمای پایین بالاتر از بیوچار با دمای بالا است، می‌تواند به‌عنوان یک منبع انرژی برای میکروارگانیسم‌های خاک

³- Desulfosporosinus

⁴- Pedobacter

¹- Geobacter

²- Anaeromyxobacter

رهاسازی آرسنیک ناشی از بیوچار عمدتاً به دلیل تغییر در جامعه میکروبی و افزایش فراوانی باکتری‌های کاهنده Fe (III) اعلام‌شده است (Rajapaksha et al., 2016).

جمع‌بندی

تبدیل بقایای کشاورزی و پس‌مانده‌ای زراعی و باغی به بیوچار و افزودن آن به خاک نتایج بسیار مفیدی در بحث ترسیب کربن به دنبال داشته و علاوه بر بهبود سطح حاصلخیزی خاک، بیوچار این ماده کربنی متخلخل پایدار با نیمه‌عمر خیلی زیاد در خاک و با سطح ویژه زیاد بر شیمی همه فلزات و شبه فلزات در خاک از جمله آرسنیک اثرگذار است. بیوچار جاذب آرسنیک است؛ اما این جذب تحت تأثیر دمای پیرولیز، نوع زیست‌توده اولیه و زمان اقامت در کوره و تکنولوژی پیرولیز قرار می‌گیرد. معمولاً بیوچار پیرولیز شده در دمای کم، جذب آرسنیک را بیشتر از بیوچار با دمای بالا تحت تأثیر قرار می‌دهد. جذب آرسنیک توسط اسیدیته محلول، دوز جاذب و جذب‌کننده و زمان تعادل نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد. در این راستا باید توجه بیشتری به اصلاح‌کننده‌های سطح بیوچار شود. اصلاح سطح بیوچار با استفاده از پوشش‌های مختلف آهن، از جمله نانو ذرات صفر بار آهن و دیگر عناصر مانند آلومینیوم و منگنز انجام شده است و نتایج مثبتی حاصل شده است و لذا قابل توصیه

است. سازوکار غالب جذب آرسنیک توسط بیوچار شامل جذب الکترواستاتیک، تبادل یونی، جذب فیزیکی و پیوند شیمیایی (کمپلکس و یا رسوب) گزارش شده است. تکنیک‌های کم‌هزینه اصلاح بیوچار مانند فعال‌سازی با بخار، فعال‌سازی با اسیدها و یا سایر فعال‌سازها پالایش آرسنیک را تسهیل می‌کنند لذا از توصیه‌های ترویجی این مقاله به شمار می‌آیند. فعال‌سازی بیوچار با نیتروژن گروه‌های عاملی امید را فراهم می‌کند که می‌توانند در افزایش جذب آرسنیک مفید باشند.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تبریز، از سردبیر محترم مجله جناب آقای دکتر بشارتی و کلیه داوران گمنام این مقاله تشکر می‌شود. همچنین از همه دانشجویان محترم در گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه تبریز که با انتخاب بیوچار به عنوان موضوع پایاننامه یا رساله کمک بزرگی به بنده کرده و از کار آنان مطالبی را آموخته‌ام سپاسگزارم.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید نویسندگان مقاله است

Reference

- Adriano, D.C, 2001. Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability, and Risk of metals, 2nd edition. Springer, New York.
- Aftabtalab, A., Rinklebe J., Shaheen S.M, Niazi, N.K., Moreno-Jimenez, E., Schaller, J., and Knorr, K.H., 2022. Review on the interactions of arsenic, iron (oxy) (hydr) oxides, and dissolved organic matter in soils, sediments, and groundwater in a ternary system. *Chemosphere*, 286(2), pp. 131-147. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131790>
- Agrafioti, E., Kalderis, D., and Diamadopoulos, E. 2014. Arsenic and chromium removal from water using biochars derived from rice husk, organic solid wastes and sewage sludge. *Journal of Environmental Management*, 133, pp. 309-314. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.12.007>
- Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., and Ok, Y.S. 2014. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. *Chemosphere*, 99, pp. 19-33. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>
- Al-Abed, S.R., Jegadeesan, G. Purandare, J. and Allen, D. 2007. Arsenic release from iron rich mineral processing waste: influence of pH and redox potential. *Chemosphere*, 66, pp. 775-782. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.07.045>
- Amen, R., Bashir, H., and Bibi, I. 2020. A critical review on arsenic removal from water using biochar-based sorbents: the significance of modification and redox reactions.

- Chemical Engineering Journal*, 396, pp.125-145. <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00181-y>
7. Beesley, L., and Marmiroli, M., 2011. The immobilization and retention of soluble arsenic, cadmium and zinc by biochar. *Environmental Pollution*, 159(2), pp. 474-480. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.10.016>
8. Beesley, L., Inneh, O. S., Norton, G. J., Moreno-Jimenez, E., Pardo, T., Clemente, R., and Dawson, J. J. 2014. Assessing the influence of compost and biochar amendments on the mobility and toxicity of metals and arsenic in a naturally contaminated mine soil. *Environmental Pollution*, 186, pp.195-202. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.11.026>
9. Beesley, L., Marmiroli, M., Pagano, L., Pignoni, V., Fellet, G., Fresno, T., & Marmiroli, N., 2013. Biochar addition to an arsenic contaminated soil increases arsenic concentrations in the pore water but reduces uptake to tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.). *Science of the Total Environment*, 454, pp. 598-603. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.02.047>
10. Bolan, N.S, Adriano, D.C and Mahimairaja, S., 2004. Distribution and bioavailability of trace elements in livestock and poultry manure by-products. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 34, pp 291-338. <https://doi.org/10.1080/10643380490434128>
11. Bolan, N., Mahimairaja, S., Kunhikrishnan, A., and Choppala, G. 2013. Phosphorus–arsenic interactions in variable-charge soils in relation to arsenic mobility and bioavailability. *Science of the Total Environment*, 463, pp. 1154-1162.
12. Brookins, D. G. 1988. Eh-pH diagrams for geochemistry. Berlin, Germany: SpringerVerlag, p 288. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.04.016>
13. Chen, Z., Wang, Y., Xia, D., Jiang, X., Fu, D., Shen, L., & Li, Q. B. 2016. Enhanced bioreduction of iron and arsenic in sediment by biochar amendment influencing microbial community composition and dissolved organic matter content and composition. *Journal of Hazardous Materials*, 311, pp. 20-29. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.02.069>
14. Cheng, C. H., and Lehmann, J., 2009. Ageing of black carbon along a temperature gradient. *Chemosphere*, 75 (8), pp. 1021-1027. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.01.045>
15. Choppala, G., Bolan, N., Kunhikrishnan, A., & Bush, R., 2016. Differential effect of biochar upon reduction-induced mobility and bioavailability of arsenate and chromate. *Chemosphere*, 144, pp. 374-381.
16. Dickens, R. and Hiltbold, A.E. 1967. Movement and persistence of methanearsonates in soil. *Weeds*, 15, pp. 299–304. <https://doi.org/10.2307/4040993>
17. Dixit, S., and Herring, J. G. 2003. Comparison of arsenic (V) and arsenic (III) sorption onto iron oxide minerals: implications for arsenic mobility. *Environmental Science & Technology*, 37 (18), pp. 4182-4189. <https://doi.org/10.1021/es030309t>
18. Dutta, P. K., Ray, A. K., Sharma, V. K., & Millero, F. J. 2004. Adsorption of arsenate and arsenite on titanium dioxide suspensions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 278 (2), pp. 270-275. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.06.015>
19. Escobar Gonzales, V. L. and Monhemius, A. J. 1988. The mineralogy of arsenates relating to arsenic impurity control. In: Reddy, R. G., Hendrix, J. L. and Queneau, P. B. (Eds.), *Arsenic Metallurgy, Fundamentals and Applications*. Metall. Soc. Inc., TMS, Warrendale, PA, pp 405–454.
20. Ferguson, J. F. and Gavis, J. 1972. A review of the arsenic cycle in natural waters. *Water Research*, 6, pp 1259–1274. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(72\)90052-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(72)90052-8)
21. Fergosen, J.F and Gavis, J. 1975. A review of the arsenic cycle in natural waters. *Water Resource* 6, pp. 1259-1274. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(72\)90052-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(72)90052-8)
22. Goldberg, S. and Glaubig, R. A. 1988. Anion srption on a calcareous, montmorillonitic soil-arsenic. *Soil Science Society of American Journal*, 52, pp. 1297-1300. <https://doi.org/10.2136/sssaj1988.03615995005200050015x>
23. Granchinho, S.C.R, Polishchuk, E., Cullen, W.R and Reimer, K.J, 2001. Biomethylation and bioaccumulation of arsenic (V) by marine alga *Fucus gardneri*. *Applied Organometallic Chemistry*, 15: 553–560. <https://doi.org/10.1002/aoc.183>

24. Gregory, S. J., Anderson, C. W. N., Arbestain, M. C., and McManus, M. T. 2014. Response of plant and soil microbes to biochar amendment of an arsenic-contaminated soil. *Agriculture, Ecosystems and Environmental*, 191, pp.133-141. **<https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.03.035>**
25. Ghodszad, L., Reyhanitabar A., Maghsoodi, M.R., Asgari Lajaer., B., and Chang, S.X., 2021. Biochar affects the fate of phosphorus in soil and water: A critical review, *Chemosphere*, 283, pp.1-13. **<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131176>**
26. Hartley, W., Dickinson, N. M., Riby, P., and Lepp, N. W. 2009. Arsenic mobility in brownfield soils amended with green waste compost or biochar and planted with *Miscanthus*. *Environmental Pollution*, 157 (10), pp. 2654-2662. **<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.05.011>**
27. Hingston, F.J., Posner A.M. and Quirk, J.P. 1971. Competitive adsorption of negatively charged ligands on oxide surfaces. *Discussions Faraday Society Articles*, 52, pp. 334–342. **<https://doi.org/10.1039/DF9715200334>**
28. Joseph, S. D., Camps-Arbestain, M., Lin, Y., Munroe, P., Chia, C. H., Hook, J., and Lehmann, J. 2010. An investigation into the reactions of biochar in soil. *Soil Research*, 48 (7), pp. 501-515. **<https://doi.org/10.1071/SR10009>**
29. Joseph, S., Husson, O., Graber, E., Van Zwieten, L., Taherymoosavi, S., Thomas, T., and Munroe, P. 2015. The electrochemical properties of biochars and how they affect soil redox properties and processes. *Agronomy*, 5 (3), pp. 322-340. **<https://doi.org/10.3390/agronomy5030322>**
30. Khadem M.D.I and Golchin, A. 2019. Risk assessment of contamination of the country's soil and water resources with arsenic. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(7) pp. 1612-1617. (In Persian). **<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.2008479.1398.50.7.24.8>**
31. Lehmann, J., Rillig, M. C., Thies, J., Masiello, C. A., Hockaday, W. C., and Crowley, D. 2011. Biochar effects on soil biota—a review. *Soil Biology and Biochemistry*, 43 (9), pp. 1812-1836. **<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022>**
32. Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Kinyangi, J., Grossman, J., O'Neill, B., and Neves, E. G. 2006. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 70 (5), pp. 1719-1730. **<https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0383>**
33. Lumsdon, D. G., Fraser A. R., Russell J. D. and Livesey N. T. 1984. New infrared band assignments for the arsenate ion adsorbed on synthetic goethite (α-FeOOH). *Soil Science*, 35, pp. 381–386. **<https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1984.tb00294.x>**
34. Ma, L.Q, Komar, K.M, Tu C, Zhang, W.H, Cai, Y. and Kennelley, E.D. 2001. A fern that hyperaccumulates arsenic: A hardy, versatile, fast-growing plant helps to remove arsenic from contaminated soils. *Nature*, pp.409- 579. **<https://doi.org/10.1038/35054664>**
35. Mahimairaja, S., Bolan, N.S, Adriano, D.C and Robinson, B., 2005. Arsenic contamination and its risk management in complex environmental settings. *Advance Agronomy*, 86:pp. 18-82. **[https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(05\)86001-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)86001-8)**
36. Mandal, B. K. and Suzuki, K. T. 2002. Arsenic round the world: a review, *Talanta*, 58, pp.201–235. **[https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(02\)00268-0](https://doi.org/10.1016/S0039-9140(02)00268-0)**
37. Manning, B. A. and Goldberg, S., 1997. Arsenic (III) and arsenic (V) adsorption on three California soils. *Soil Science*, 162, pp. 886-895. **<https://doi.org/10.1097/00010694-199712000-00004>**
38. Meharg, A. A., and Hartley-Whitaker, J. 2002. Arsenic uptake and metabolism in arsenic resistant and nonresistant plant species. *New Phytologist*, 154 (1), pp. 29-43. **<https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2002.00363.x>**
39. Mirzaie, N., Reyhanitabar, A., Oustan, S., and Hagighat Afshar, M. 2014. Effects of combined application of As and P on the growth characteristics and uptake of As and P by two wheat and marigold plants. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 45(3), pp. 353-367. (In Persian). **<https://doi.org/10.22059/ijswr.2014.52200>**
40. Mirzaie, N., Reyhanitabar, A., Oustan, S., and Hagighat Afshar, M. 2014. Interactive effects of arsenic and phosphorus on the uptake of calcium, magnesium and potassium by wheat (*Triticum aestivum* L.) and Marigold (*Tagetes erecta*). *Applied Soil Research*, 2(1), pp. 43-58. (In Persian). **<https://doi.org/10.22059/ijswr.2014.52200>**

41. Moreno-Jiménez, E., Esteban, E., and Peñalosa, J. M. 2012. The fate of arsenic in soil-plant systems. Reviews of environmental contamination and toxicology .Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1463-6_1
42. Nadiri, A., Asghari Moghaddam, A., Sadeghi, F. and Aghaee, H. 2012. Investigation of arsenic anomalies in water resources of Sahand dam. *Journal of Environmental studies*, 38(3), 61-74. (In Persian).<https://doi.org/10.22059/jes.2012.29149>
43. Nagodavithane, C. L., Singh, B., & Fang, Y. 2014. Effect of ageing on surface charge characteristics and adsorption behaviour of cadmium and arsenate in two contrasting soils amended with biochar. *Soil Research*, 52 (2), pp. 155-163. <http://dx.doi.org/10.1071/SR13187>
44. Naidu, R., Bolan, N.S and Owens, G. 2003. Risk based land management: A cost effective tool for contaminated land management. Pp. 5–19. In: Currie LD, Stewart RB and Anderson CWN (eds). Environmental Management using Soil–Plant Systems, Occasional Report No. 16. Fertilizer and Lime Research Centre, Massey University, Palmerston North.
45. Naidu, R., 2006. Managing Arsenic in the Environment from Soil to Human Health. CSIRO Publishing, Australia
46. Namgay, T., Singh, B., and Singh, B. P. 2010. Influence of biochar application to soil on the availability of As, Cd, Cu, Pb, and Zn to maize (*Zea mays* L.). *Soil Research*, 48 (7), pp. 638-647. <http://dx.doi.org/10.1071/SR10049>
47. Naseri, E., Reyhanitabar, A., Oustan, S., Heydari, A., and Alidokht, L., 2014. Optimization arsenic immobilization in a sandy loam soil using iron-based amendments by response surface methodology. *Geoderma*, 232, pp.547-555. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.06.009>
48. Ohtsuka, T., Yamaguchi, N., Makino, T., Sakurai, K., Kimura, K., Kudo, K., & Amachi, S. 2013. Arsenic dissolution from Japanese paddy soil by a dissimilatory arsenate-reducing bacterium *Geobacter* sp. OR-1. *Environmental Science & Technology*, 47(12), pp. 6263-6271. <http://dx.doi.org/10.1021/es400231x>
49. Pais, I. and Jones Jr, J. B. 1997. The Handbook of Trace Elements (First Edition). Bosa Roca, United States: Taylor and Francis Inc.
50. Pierce, M.L. and Moore, C.B. 1982. Adsorption of arsenite and arsenate on amorphous iron hydroxide. *Water Research*, 16, pp. 1247-1253. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(82\)90143-9](https://doi.org/10.1016/0043-1354(82)90143-9)
51. Polemio, M., Senesi, N. and Bufo, S.A. 1982. Soil contamination by metals. A survey in industrial and rural areas of southern Italy. *Science of the Total Environment*, 25, pp. 71-79. [http://dx.doi.org/10.1016/0048-9697\(82\)90043-2](http://dx.doi.org/10.1016/0048-9697(82)90043-2)
52. Qiu, J., Souza, M.F., Wang, X., Chafik, Y., Morabito, D., Ronsse, F., Sikok, Y., and Meers, E. 2024. Dynamic performance of combined biochar from co-pyrolysis of pig manure with invasive weed: Effect of natural aging on Pb and As mobilization in polluted mining soil. *Science of the Total Environment*, 935, pp. 173424. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173424>
53. Rajapaksha, A. U., Vithanage, M., Lim, J. E., Ahmed, M. B. M., Zhang, M., Lee, S. S., and Ok, Y. S. 2014. Invasive plant-derived biochar inhibits sulfamethazine uptake by lettuce in soil. *Chemosphere*, 111, pp. 500-504. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.04.040>
54. Rajapaksha, A. U., Chen, S. S., Tsang, D. C., Zhang, M., Vithanage, M., Mandal, S., and Ok, Y. S. 2016. Engineered/designer biochar for contaminant removal/immobilization from soil and water: potential and implication of biochar modification. *Chemosphere*, 148, pp. 276-291. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.01.043>
55. Reyhanitabar, A., Farhadi, E., Ramezanzadeh, H., and Oustan S. 2020. Effect of pyrolysis temperature and feedstock sources on physicochemical characteristics of biochar. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 22(2), pp. 547–561. <http://dori.net/dor/20.1001.1.16807073.2020.22.2.21.9>
56. Rinklebe, J., Shaheen, S. M., & Frohne, T. 2016. Amendment of biochar reduces the release of toxic elements under dynamic redox conditions in a contaminated floodplain

- soil. *Chemosphere*, 142, pp. 41-47. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.03.067>
57. Sadiq, M. 1997. Arsenic chemistry in soils: An overview of thermodynamic predictions and field observations. *Water Air and Soil Pollution*, 93, pp. 117-136. <https://doi.org/10.1007/BF02404751>
58. Samsuri, A. W., Sadegh-Zadeh, F., & Seh-Bardan, B. J. 2013. Adsorption of As (III) and As (V) by Fe coated biochars and biochars produced from empty fruit bunch and rice husk. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1 (4), pp. 981-988. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2013.08.009>
59. Sepehr, E., and Shiriazar, M.A. 2020. Methods of arsenic decontamination of soil and water. *Applied Soil Research*, 8(4), pp. 69-84. (In Persian)
60. Shiriazar, M.A., Sepehr E, Maleki R, Khodaverdiloo, H, Asadzadeh and Dovlati, B.2020. Removal of arsenate from aqueous solutions using iron-modified biochar. *Journal of Water and Soil Conservation*, 27(2), pp.126-143. (In Persian)
61. Smedley, P.L. and Kinniburgh, D.G. 2002. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 17, pp. 517-568. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00018-5)
62. Smith, E., Naidu, R. and Alston, A. M. 1998. Arsenic in the soil environment: A review. *Advances in Agronomy*, 64, pp.149-195. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60504-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60504-0)
63. Stefanakis, M. and Kontopoulos, A. 1988. Production of environmentally acceptable arsenites-arsenates from solid arsenic trioxide. In "Arsenic Metallurgy, Fundamentals and Applications" (Reddy, Hendrix, and Queneau, Eds. Metallurgy Society. Pp, 287-304.
64. Steiner, C., Teixeira, W. G., Lehmann, J., Nehls, T., de Macêdo, J. L. V., Blum, W. E., and Zech, W. 2007. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant and Soil*, 291 (1-2), pp. 275-290. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9193-9>
65. Sun, X. and Doner, H. E., 1996. An investigation of arsenate and arsenite bonding structures on goethite by FTIR. *Soil Science*, 161, pp. 865-872. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-199612000-00006>
66. Tan, X., Liu, Y., Zeng, G., Wang, X., Hu, X., Gu, Y., & Yang, Z. 2015. Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. *Chemosphere*, 125, pp. 70-85. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.12.058>
67. Thanabalasingam, P. and Pickering, W.F. 1986. Arsenic sorption by humic acids. *Environmental Pollution*, 12, pp. 233-246. [https://doi.org/10.1016/0143-148X\(86\)90012-1](https://doi.org/10.1016/0143-148X(86)90012-1)
68. Tytlak, A., Oleszczuk, P., and Dobrowolski, R. 2015. Sorption and desorption of Cr (VI) ions from water by biochars in different environmental conditions. *Environmental Science and Pollution Research*, 22 (8), pp. 5985-5994. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-014-3752-4>
69. Van Vinh, N., Zafar, M., Behera, S. K., and Park, H. S. 2015. Arsenic (III) removal from aqueous solution by raw and zinc-loaded pine cone biochar: equilibrium, kinetics, and thermodynamics studies. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12 (4), pp. 1283-1294. <http://dx.doi.org/10.1007/s13762-014-0507-1>
70. Vithanage, M., Herath, I., Joseph, S., Bundschuh, J., Bolan, N., Ok, Y. S., and Rinklebe, J., 2017. Interaction of arsenic with biochar in soil and water: a critical review. *Carbon*, 113, pp. 219-230. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2016.11.032>
71. Wang, S., and Mulligan, C. 2006. Occurrence of arsenic contamination in Canada: sources, behavior, and distribution. *Science Total Environ*, 366, pp.701-721. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.09.005>
72. Wang, N., Xue, X. M., Juhasz, A. L., Chang, Z. Z., and Li, H. B. 2017. Biochar increases arsenic release from an anaerobic paddy soil due to enhanced microbial reduction of iron and arsenic. *Environmental Pollution*, 220, pp. 514-522. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.09.095>
73. WHO.2023.Arsenic in drinking water. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs210/en/>

74. Xu, H., Allard, B. and Grimvall, A. 1988. Influence of pH and organic substance on the adsorption of As (V) on geologic materials. *Water Air and Soil Pollution*, 40, pp. 293–305. **<https://doi.org/10.1007/BF00163734>**
75. Yamamura, S., and Amachi, S. 2014. Microbiology of inorganic arsenic: from metabolism to bioremediation. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 118(1), 1-9. **<https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2013.12.011>**
76. Yan-Chu, H. 1994. Arsenic distribution in soils. In “Arsenic in the Environment, Part I: Cycling and Characterization” (J. O. Nriagu, Ed.), Wiley, New York. pp. 17–49.
77. Zhang, M., Gao, B., Varnoosfaderani, S., Hebard, A., Yao, Y., and Inyang, M. 2013. Preparation and characterization of a novel magnetic biochar for arsenic removal. *Bioresource Technology*, 130, pp. 457-462. **<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.11.132>**
78. Zhang, Q. Z., Dijkstra, F. A., Liu, X. R., Wang, Y. D., Huang, J., and Lu, N. 2014. Effects of biochar on soil microbial biomass after four years of consecutive application in the north China plain. *PloS One*, 9(7), pp. 201-206. **<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102062>**
79. Zhang, W., Zheng, J., Zheng, P., Tsang, D. C., and Qiu, R. 2015. Sludge-derived biochar for arsenic (III) immobilization: effects of solution chemistry on sorption behavior. *Journal of Environmental Quality*, 44(4), pp. 1119-1126. **<https://doi.org/10.2134/jeq2014.12.0536>**
80. Zhang, Wei., Yoora, Cho., Meththika, V., Sabry, M., Shaheen, J. R., Daniel, S., Alessi ,C.H. H, Yohey, H., Piumi, A. W and Yong S.O. 2022. Arsenic removal from water and soils using pristine and modified biochars. Arsenic removal from water and soils using pristine and modified biochars. *Biochar*, 4(55), pp.1-26. **<https://doi.org/10.1007/s42773-022-00181-y>**

فیزیولوژی کلسیم و مدیریت مصرف آن در باغ‌های مرکبات

علی اسدی کنگرشاهی*  و نگین اخلاقی امیری

دانشیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری،

ایران. kangarshahi@gmail.com

استادیار بخش علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری،

ایران. neginakhlaghi@yahoo.com

دریافت: مهر ۱۴۰۳ و پذیرش: اسفند ۱۴۰۳

چکیده

هدف از این بررسی، ارزیابی مدیریت کوددهی کلسیم برای درختان مرکبات بود. این ارزیابی می‌تواند به شناخت بهتر نیاز به کلسیم، مقدار و زمان مصرف آن، روند جذب و انتقال کلسیم به برگ‌ها و میوه‌ها در این درختان منجر شود که در بهبود کیفیت میوه‌ها بسیار مؤثر است. کلسیم پس از پتاسیم و نیتروژن بیشترین غلظت در میوه مرکبات دارد اما اولین عنصر از نظر مقدار، در بیوماس درختان مرکبات است (بیشتر از پتاسیم و نیتروژن). مقدار کلسیمی که توسط مرکبات برداشت می‌شود حدود ۵۵۰ تا ۶۰۰ گرم به ازای هر تن میوه تازه است. پس از تشکیل میوه، میوه‌چه‌های در حال توسعه، نیاز فوری و پایدار به کلسیم دارند که توسط آوندهای چوبی تأمین می‌شود که شدیداً به تعلق از سطح این بافت‌ها و اندام‌ها وابسته است. بنابراین، شرایط اقلیمی و مدیریتی نامناسب مانند تنش خشکی، تنش مانداب، تنش گرما، کمبود ساعات آفتابی، رطوبت نسبی زیاد، مصرف زیاد کودهای شیمیایی به‌ویژه نیتروژن و پتاسیم در مرحله اول رشد میوه، احتمال کمبود کلسیم در این بافت‌های در حال توسعه را تشدید می‌کند. نتایج پژوهش‌های مختلف نشان داده است که مناسب‌ترین زمان برای مصرف و افزایش کلسیم میوه‌ها در درختان مرکبات، مرحله اول و اوایل مرحله دوم رشد میوه است و پس از آن راندمان انتقال کلسیم به میوه‌ها به‌شدت کاهش می‌یابد. از طرفی کلسیم بیشترین تأثیر در سفتی بافت میوه‌ها، کاهش روند نرم شدن و کاهش وزن میوه‌ها در طول دوره ذخیره‌سازی، کاهش ناهنجاری‌های فیزیولوژیک و کاهش درصد پوسیدگی میوه‌ها در دوره انبارمانی دارد. بنابراین هدف از مدیریت کوددهی کلسیم، اطمینان از دریافت بهینه کلسیم توسط میوه‌ها، افزایش کیفیت و بازارپسندی میوه‌ها، پایداری تولید، کاهش ناهنجاری‌های فیزیولوژیک، افزایش زمان انبارمانی و حفظ کیفیت آن‌ها در طی دوره انبارمانی است. لذا توصیه می‌شود که باغ‌داران، مدیریت مصرف کلسیم (محلول‌پاشی یا کودآبیاری) در مرحله اول و اوایل تا اواسط مرحله دوم انجام دهند و از کوددهی در اواخر مرحله دوم رشد میوه، کوددهی قبل از برداشت و غوطه‌وری میوه‌های مرکبات در محلول کلسیم پس از برداشت اجتناب کنند.

واژه‌های کلیدی: روند جذب کلسیم، فنولوژی رشد میوه، کودهای کلسیم، نیاز کلسیم

* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: kangarshahi@gmail.com

نوع مقاله: مروری



مقدمه

به‌طور کلی بیش از ۳۰ درصد از خاک‌های سطح زمین، خاک‌های آهکی هستند (FAO, 2016). از طرفی برخی خاک‌ها می‌توانند آهکی شوند اگر برای مدت طولانی با آب دارای کربنات کلسیم بالا آبیاری شوند (Taalab et al., 2019). با افزایش غلظت کربنات کلسیم در محلول خاک، کربنات کلسیم ثانویه ممکن است در منافذ ریز و متوسط خاک در تماس با سطوح ذرات خاک تشکیل شود (FAO, 2016). در ایران اغلب خاک‌های کشاورزی، آهکی هستند به‌طوری‌که بیشتر از ۸۷ درصد آن‌ها کربنات کلسیم بیشتر از پنج درصد دارند و حدود ۵۸ درصد از این خاک‌ها بین ۱۰ تا ۴۰ درصد کربنات کلسیم دارند (Tehrani and Ghaffari Nejad, 2016). کمبود کلسیم در اغلب مرکبات جهان وجود دارد (Srivastava, 2012). در کشور نیز، بصیرت و همکاران (۲۰۱۸) کمبود کلسیم را در اغلب باغ‌های مرکبات جنوب گزارش کردند و علت کمبود آن را غلظت زیاد پتاسیم و شوری بالای منطقه ریشه بیان داشتند (Basirat et al., 2018). در شمال کشور نیز یکی از چالش‌های اصلی باغداران مرکبات، کمبود کلسیم است که موجب کاهش زمان انبارمانی میوه‌ها، افزایش پوسیدگی ریشه و زوال درختان، کاهش تحمل درختان به تنش‌های محیطی و همچنین کاهش راندمان جذب برخی عناصر غذایی شده است (Asadi Kangarshahi and Akhlaghi Amiri, 2018; Asadi Kangarshahi, 2021).

بنابراین کمبود کلسیم در اغلب باغ‌های مرکبات جهان به‌ویژه در خاک‌های اسیدی، خاک‌های با بافت سبک، خاک‌های با بافت سنگین و متراکم، خاک‌های دارای تنش مانداب و غرقاب، خاک‌های با بارندگی زیاد یا آبیاری سنگین وجود دارد. عوامل متعددی در توسعه کمبود کلسیم و شدت خسارت این ناهنجاری در درختان میوه تأثیر دارند. یک سری از این عوامل خاکی هستند و بر جذب کلسیم توسط ریشه تأثیر دارند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به رطوبت خاک، شوری محلول خاک، تهویه خاک (اکسیژن خاک)، درجه حرارت خاک، میزان یا غلظت کلسیم در

محلول خاک، تعادل کاتیون‌ها و آنیون‌ها، توسعه و تولید ناکافی ریشه‌های جدید در خاک اشاره کرد. عوامل دیگری که در توسعه و تشدید کمبود کلسیم تأثیر دارند عوامل اقلیمی هستند که شامل درجه حرارت هوا، غلظت دی اکسیدکربن، فتوپریود (طول روز)، رطوبت نسبی محیط، نوسان روزانه پتانسیل آب و سطح تابش نور خورشید است. به‌طور کلی کلسیم توسط نوک ریشه جذب می‌گردد و در مسیر تعلق از طریق آوند چوبی به اندام هوایی منتقل می‌شود. این عنصر در آوند آبکش متحرک نبوده و نمی‌تواند از یک شاخساره به سایر اندام‌ها یا نقاط مریستمی منتقل شود. مانداب و غرقاب شدن منطقه ریشه، آبیاری بیش از حد، تنش خشکی، تنش سرما و یخبندان، خسارت‌های فیزیولوژیکی و مکانیکی به ریشه‌ها، فشردگی خاک و بیماری‌های ریشه‌ای موجب کاهش جذب کلسیم توسط ریشه‌ها و انتقال آن به اندام هوایی درختان مرکبات می‌شوند. کمبود کلسیم موجب مرگ سریع مریستم‌ها از جمله مرگ مریستم‌های انتهایی سرشاخه‌ها و مریستم‌های انتهایی ریشه‌ها می‌شود که به نوبه خود شدت کمبود کلسیم در درختان را تشدید می‌کنند. البته برخی بیماری‌ها از جمله بیماری تریستیزا و گرینینگ موجب آسیب به ریشه‌ها می‌شود و این آسیب دیدن ریشه موجب تشدید کمبود کلسیم و در نتیجه مرگ نوک ریشه‌ها و کاهش جذب کلسیم می‌گردد و سبک به این شکل ادامه داشته و در هر مرحله شدت کمبود بیشتر خواهد شد. از طرفی مصرف برگی کلسیم نیز به دلیل عدم توانایی انتقال کلسیم در آوند آبکشی، در افزایش کلسیم ریشه‌ها مؤثر نیست. مدیریت تغذیه کلسیم در درختان مرکبات دارای بیماری‌های از جمله تریستیزا و گرینینگ از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است (Olle and Bender, 2009; Mcainsh and Pettman, 2009).

بنابراین با توجه به وابستگی حرکت کلسیم در آوندهای چوبی به جریان تعلق و عدم تحرک و انتقال مجدد آن در بافت‌های درختان مرکبات (از بافت‌های مسن به بافت‌های در حال توسعه)، کمبود موقت آن سریعاً بر

رشد و توسعه اندام‌های در حال رشد، ریزش میوه‌چه‌ها در اوایل مرحله اول رشد میوه و مقدار کلسیم بافت و کیفیت میوه‌های مرکبات تأثیر دارد. کمبود کلسیم در میوه مرکبات موجب ریزش زیاد میوه‌چه‌ها در اوایل مرحله اول رشد میوه، ترک خوردن میوه‌ها، پفی شدن میوه‌ها، نرم شدن بافت پوست میوه‌ها، پوسیدگی زیاد در انبار، پوسیدگی و کاهش زیاد وزن میوه‌ها در مسیر انتقال و صادرات می‌شود که یک چالش مهم برای بسیاری از تولیدکنندگان و صادرکنندگان این محصول است و در سال‌های اخیر، به علت کشت‌های متراکم و همچنین افزایش عملکرد در واحد سطح، این چالش تشدید نیز شده است. هدف این مقاله، درک بهتر اهمیت کلسیم، شناخت جذب و انتقال کلسیم، مقدار کوددهی، زمان مناسب کوددهی متناسب با فنولوژی رشد و توسعه میوه، روش‌های مناسب کوددهی کلسیم برای درختان مرکبات است که می‌تواند در افزایش کلسیم و سفتی بافت میوه‌ها، افزایش قابلیت انبارمانی، امکان صادرات میوه‌ها با حفظ کیفیت در مسیرهای طولانی‌تر و اقتصاد باغداران بسیار مؤثر باشد.

کلسیم در خاک

کلسیم، پنجمین عنصر از نظر فراوانی در پوسته زمین است. به‌طور کلی کلسیم به شکل کانی، تبادلی و محلول در خاک وجود دارد. کلسیم محلول و قابل تبادل، شکل‌های اصلی کلسیم قابل جذب در خاک هستند. سولفات کلسیم و کربنات کلسیم، کانی‌های عمده کلسیم در خاک هستند. سولفات کلسیم معمولاً در خاک‌های خشک

(خاک‌هایی با غلظت سولفات بیش از ۰/۰۱ مول در لیتر) و کربنات کلسیم در خاک‌هایی با pH بیشتر از ۷ وجود دارد. اما در pH حدود ۷/۵ تا ۸، سولفات کلسیم و کربنات کلسیم، هر دو می‌توانند در خاک وجود داشته باشند (Basour and Sayegh, 2007; Yang et al., 2010). کلسیم قابل تبادل در تعادل با کلسیم محلول خاک است. قدرت نسبی اتصال کلسیم به محل‌های تبادلی، تعادل بین کلسیم تبادلی و محلول را کنترل می‌کند. پژوهش‌های مختلف نشان داده است که برای جذب کافی کلسیم توسط ریشه، باید حدود ۸۰-۶۰ درصد ظرفیت تبادلی خاک را کلسیم اشغال کرده باشد و یا بیش از ۱۵ درصد کلسیم قابل دسترس در محلول خاک وجود داشته باشد. این مسئله در خاک‌های شور که سدیم با کلسیم در اشغال سایت‌های تبادلی و همچنین جذب توسط ریشه رقابت می‌کند از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. همچنین مصرف زیاد پتاسیم نیز به علت رقابت با جذب کلسیم، می‌تواند روند زوال را در درختان دارای ناهنجاری زوال را تشدید نماید. غلظت کلسیم در محلول خاک با pH خاک و ویژگی‌های خاک تغییر می‌کند و معمولاً بین ۲۰ تا ۴۰ میلی‌گرم در لیتر است. ولی در خاک‌های مناطق خشک، حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر است. نتایج گزارش‌های اسدی کنگرشاهی (۲۰۱۹) نشان داد که خاک‌های با بافت لوم بیشترین غلظت کلسیم در محلول خاک داشتند و در مقابل خاک‌های با بافت سبک و سنگین از کلسیم محلول کمتری برخوردار بودند (جدول ۱).

جدول ۱- کلسیم محلول خاک

Table 1- Calcium in soil solution (Asadi Kangarshahi, 2019)

کلسیم محلول (میلی‌گرم در لیتر) Ca solution (mg/l)	کربن آلی (درصد) O.C. (%)	آهک (درصد) Lime (%)	کلاس بافتی خاک Soil texture class	شماره خاک Soil
174	1.17	2	لوم loam	1
135	0.95	9	لوم رسی sandy clay loam	2
122	1.80	14	لوم loam	3
104	1.60	30	رسی clay	4
54	0.65	40	لوم رسی sandy loam	5
116	1.52	25	لوم رسی clay loam	6
212	1.10	45	لوم loam	7

تحرك، جذب و انتقال کلسیم به اندام هوایی (برگ‌ها و میوه‌ها)

کلسیم موجود در خاک و هر کود کلسمی (نیترات کلسیم و) که به خاک منطقه ریشه درختان داده شود برای جذب، ابتدا باید حل شده و وارد محلول خاک شود و سپس همراه با جریان آب به سطح ریشه منتقل شوند. حرکت آب به سطح ریشه تحت تأثیر اختلاف پتانسیل آبی خاک اطراف ریشه و پتانسیل آبی سطح ریشه است. برای ایجاد و تشدید این اختلاف پتانسیل آبی، وجود ریشه‌ها و برگ‌های فعال و مؤثر ضروری است. تبخیر و تعرق از برگ‌ها موجب ایجاد کشش و حرکت جریان آب در آوندهای چوبی می‌شود که در نهایت به سلول‌های سطح ریشه می‌رسد و موجب کاهش پتانسیل آب در سطح ریشه شده و آب از خاک اطراف ریشه (با پتانسیل آبی بیشتر) به سطح ریشه (با پتانسیل آبی کمتر) منتقل می‌شود. همراه با حرکت و انتقال آب به سطح ریشه، کلسیم محلول در آن نیز به سطح ریشه منتقل می‌شوند. جذب کلسیم در ریشه درختان مرکبات به مناطقی از ریشه محدود می‌شود که حلقه کاسپارین بین سلول‌های آندودرمی وجود ندارد، یا تخریب شده یا سلول‌های آندودرمی احاطه‌کننده استوانه مرکزی (استیل) چوب بنبه‌ای نشده‌اند این نواحی عمدتاً شامل نوک ریشه‌ها و نواحی است که در آن جوانه‌های جانبی شروع به تشکیل می‌کنند (Marschner, 1995; White and Broadley, 2003). به‌طور کلی از علائم شروع فعالیت مجدد درختان مرکبات، رشد سرشاخه‌های سال جاری است که در منطقه شمال کشور رشد مجدد سرشاخه‌ها عمدتاً از اواسط فروردین ماه شروع شده و در اواسط تا اواخر اردیبهشت‌ماه کامل می‌شود. بنابراین در مرکبات شمال شروع جذب عناصر غذایی از اواسط فروردین‌ماه با حداقل راندمان شروع می‌شود و سپس به ترتیب افزایش می‌یابد و در اوایل تا اواسط تابستان (با توجه به نوع رقم) به حداکثر می‌رسد. در بیشتر مناطق جنوب کشور، رشد مجدد سرشاخه‌ها از اوایل تا اواخر اسفندماه شروع و در اواخر فروردین‌ماه کامل می‌شوند. بنابراین جذب و انتقال عناصر

به سطح ریشه با راندمان حداقلی از اسفندماه شروع و در فروردین و اردیبهشت به حداکثر می‌رسند (Asadi Kangarshahi and Akhlaghi Amiri, 2014; Asadi Kangarshahi, 2019).

نتایج پژوهش‌های مختلف نشان داده است که بافت‌های در حال توسعه، نیاز فوری و مداوم به کلسیم دارند که توسط آوندهای چوبی تأمین می‌شود و شدیداً به تعرق از سطح برگ این بافت‌ها و اندام‌ها وابسته است. کمبود کلسیم و ناهنجاری‌های ناشی از آن، زمانی ایجاد می‌شود که تعرق پایین و جریان شیره خام نتواند کلسیم کافی برای توسعه بافت‌های در حال توسعه را فراهم نماید. از این‌رو، کمبود کلسیم به‌طور عمده در بافت‌های در حال توسعه و به‌ویژه در نواحی مرستمی ایجاد می‌شود (Hopkins and Huner, 2004; White and Broadley, 2003). بنابراین کمبود ساعات آفتابی و رطوبت نسبی زیاد در زمان توسعه سرشاخه‌ها، گل‌ها و میوه‌ها، احتمال کمبود کلسیم در بافت‌های در حال توسعه را تشدید می‌کند. از طرفی کلسیم به شکل کاتیون دو ظرفیتی (Ca^{2+}) جذب می‌شود و توسط آوند چوبی به اندام هوایی منتقل می‌شود و در آوندهای آبکش غیر متحرک است. کلسیم در شیره آوند چوبی توسط جریان تعرق به سمت اندام هوایی و برگ‌ها منتقل می‌شود (Hirschi, 2004).

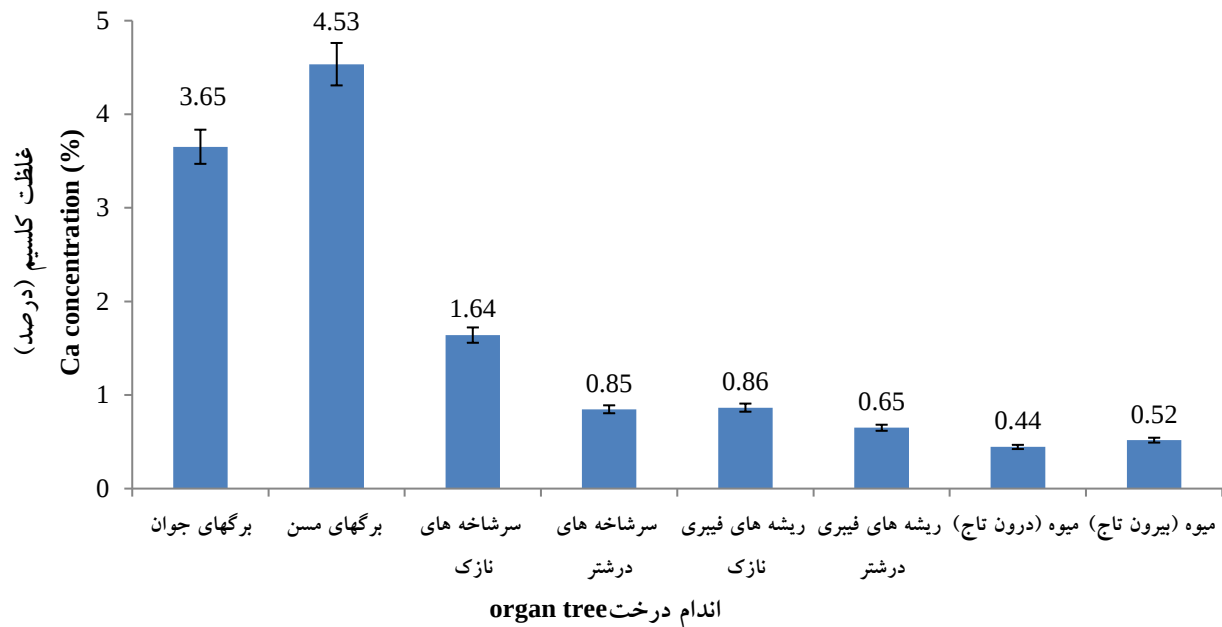
کلسیم نمی‌تواند مجدداً از بافت‌های مسن جابجا و توسط آوند آبکشی توزیع شود بنابراین فراهمی کلسیم در بافت‌های در حال رشد توسط آوند چوبی انجام می‌شود. محلول‌پاشی کلسیم (نیترات کلسیم) عمدتاً برای اجتناب از کمبود کلسیم در میوه‌ها استفاده می‌شود و افزایش کلسیم تأثیر زیادی در بهبود کیفیت میوه مرکبات دارد. کلسیم در میوه‌های تازه اهمیت زیادی دارد و مقدار آن در میوه بسیار کمتر از برگ‌ها است حداکثر جذب کلسیم در میوه مرکبات حدوداً پس از تشکیل میوه تا ۴۵ الی ۵۰ روز پس از گلدهی است و پس از ریزش فیزیولوژی تابستانه میوه‌چه‌ها، جذب به‌سرعت کاهش می‌یابد. در میوه مرکبات، بیشتر کلسیم در فاز اول رشد میوه تا حدود ۱۰۰ روز پس از گلدهی به بافت

آلبدو وارد می‌شود و سپس کلسیم بین آلبدو و گوشت میوه توزیع می‌شود. پس از ریزش فیزیولوژیکی میوه‌چه‌ها (ریزش خردادماه)، واکس سطح پوست میوه به سرعت توسعه می‌یابد و افزایش واکس موجب کاهش کارایی جذب کلسیم خواهد شد. بنابراین نتایج این تحقیق نشان داد که محلول‌پاشی نیترات کلسیم در مرحله اول رشد میوه (از زمان تشکیل میوه تا زمان ریزش فیزیولوژی یا ریزش تابستانه میوه‌چه‌ها) در افزایش کلسیم پوست میوه بسیار مؤثرتر از محلول‌پاشی در مرحله دوم رشد میوه (به‌ویژه از اواسط تا اواخر مرحله دوم رشد میوه) و همچنین مرحله سوم رشد میوه است (Asadi Kangarshahi and Akhlaghi Amiri, 2018; Saure, 2005; Schlegel and Schonherr, 2002).

کلسیم در درختان مرکبات

کلسیم پس از پتاسیم و نیتروژن بیشترین غلظت در میوه مرکبات دارد مقدار کلسیمی که توسط میوه تازه مرکبات برداشت می‌شود حدود ۵۵۰ تا ۶۰۰ گرم به ازای هر تن میوه تازه است. همچنین کلسیم اولین عنصر از نظر مقدار، در بیوماس درختان مرکبات است (بیشتر از پتاسیم و نیتروژن) مقدار کلسیمی که توسط بیوماس درختان بارده مرکبات از خاک خارج می‌شود حدود ۱۵۰ تا ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار است. غلظت کلسیم در برگ‌های درختان مرکبات، حدود سه تا پنج درصد وزن خشک برگ است که بیشتر از دیگر عناصر غذایی است. نتایج پژوهشی

نگارندگان نشان داده است غلظت کلسیم در برگ‌ها، با افزایش سن برگ درختان افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که غلظت کلسیم در برگ‌ها در اواسط خردادماه، حدود ۰/۸۸ درصد کمتر از برگ‌ها در مردادماه است. همچنین با افزایش سن و قطر سرشاخه‌ها و خشبی شدن آن‌ها، غلظت کلسیم در آن کاهش می‌یابد به‌طوری‌که غلظت کلسیم در سرشاخه‌های کمتر از یک سانتی‌متر، حدود ۱/۶۴ درصد بر اساس وزن خشک است و در سرشاخه‌های بزرگ‌تر به حدود ۰/۸۵ درصد می‌رسد. در مقابل، نتایج غلظت کلسیم در ریشه‌ها نشان داد که غلظت کلسیم در ریشه‌های فیبری کمتر از غلظت کلسیم در سرشاخه‌ها است غلظت کلسیم در ریشه‌های فیبری کمتر از یک سانتی‌متر حدود ۰/۸۶ درصد و در ریشه‌های فیبری بزرگ‌تر حدود ۰/۶۵ درصد است (شکل ۱). راهنمای حدود مطلوب غلظت کلسیم در برگ ارقام مختلف مرکبات در جدول ۲ آورده شده است. همچنین در جدول ۳، مدیریت برنامه کودی بر اساس نتایج تجزیه برگ نشان داده شده است. اگر غلظت کلسیم در برگ کمتر از حد مطلوب باشد با توجه به نوع خاک ممکن است دلایل متفاوتی داشته باشد در خاک‌های آهکی مهم‌ترین دلیل می‌تواند توقف رشد ریشه، سنگینی بافت خاک، پوسیدگی ریشه، ماندابی شدن منطقه ریشه و ... باشد اما در خاک‌های اسیدی، مقدار کلسیم قابل تبادل خاک باید کنترل شود اما به‌طورکلی عوامل اقلیمی، خاکی و فیزیولوژی ممکن است در کمبود کلسیم مؤثر باشند (Asadi Kangarshahi and Akhlaghi Amiri, 2018).



شکل ۱- غلظت کلسیم در اندام‌های مختلف درختان پرتقال تامسون ناول

Figure 1- Calcium concentration in different organs of 'Thomson' navel orange trees (asadi Kangarshahi, 2019)

جدول ۲- راهنمای تفسیر نتایج تجزیه کلسیم برگ برای درختان مرکبات

Table 2- Guidelines for interpretation of leaf Ca for citrus trees (asadi Kangarshahi, 2019)

Ca concentration (%) غلظت کلسیم (درصد)					عنصر
Excess خیلی زیاد	High زیاد	optimum مناسب	low کم	Deficient کمبود	element
>7	5.5-7	3-5.5	1.5-3	< 1.5	Ca کلسیم

جدول ۳- تنظیم برنامه کودی مرکبات بر اساس آزمون برگ

Table 3- Adjusting a citrus fertilization program based on leaf analysis

اگر غلظت عنصر غذایی در برگ کمتر از مقدار مطلوب باشد	اگر غلظت عنصر غذایی در برگ بیشتر از مقدار مطلوب باشد
۱. در خاک‌های آهکی، مانداب منطقه ریشه کنترل شود.	✓ هیچ اقدامی لازم نیست.
۱. pH خاک کنترل شود.	
۲. در خاک‌های اسیدی، مقدار کلسیم خاک کنترل شود.	
۳. در خاک‌های اسیدی (با توجه به pH خاک)، آهک به روش خاکی در منطقه ریشه و کودهای محلول کلسیم (مانند نیترات کلسیم و کلرید کلسیم) به روش کود آبیاری توصیه می‌شود. اما در خاک‌های آهکی، محلول پاشی کودهای محلول کلسیم (مانند نیترات کلسیم یا کلات‌های آلی کلسیم) انجام شود.	

علائم ظاهری کمبود کلسیم در مرکبات

یکی از مهم‌ترین علائم کمبود کلسیم و بور در درختان مرکبات در اوایل فصل رشد به‌ویژه در مناطقی با کمبود ساعات آفتابی و رطوبت نسبی زیاد، پوسیدگی مریستم‌های نهایی رشد و ریزش شدید میوه‌چه‌های در مرحله اول رشد میوه و ریزش تابستانه است. از دیگر

علائم کمبود کلسیم در درختان مرکبات، کم‌رنگ شدن کلروفیل در طول حاشیه برگ‌ها و بین رگبرگ‌های اصلی در زمستان است. کمبود کلسیم سبب کاهش توان درختان، کاهش تولید، تنک شدن برگ‌ها و برگ‌های کوچک ضخیم می‌شود. در درختان با کمبود شدید کلسیم، دای‌بک^۱ شاخه‌های انتهایی و رشد جوانه‌های ثانویه برگ افزایش

۵. افزایش ترک خوردن یا شکاف خوردن میوه.
۶. افزایش چین خوردگی پوست میوه‌ها (کریزینگ)
۷. افزایش درصد پوسیدگی میوه‌ها در انبار (کاهش زمان انبارمانی)
۸. نرم و شل شدن میوه‌ها پس از ذخیره در انبار

کلسیم، سفتی بافت میوه و پایداری دیواره سلولی

سفتی میوه یک پارامتر کیفیت حیاتی در بازاریابی میوه است (Huang et al. 2023). کلسیم با تقویت ساختار دیواره سلولی، تقویت پیوند اتصال سلولی و تشکیل پکتات کلسیم در صورت ترکیب با اسید پکتیک، سفتی بافت میوه را افزایش می‌دهد (ژانگ و وانگ، ۲۰۱۹). علاوه بر این، مصرف کلسیم باعث تجمع هموگالاکتورون‌ها و افزایش تعداد شبکه‌های پکتین می‌شود که در سفتی بافت میوه و افزایش زمان انبارمانی آن تأثیر دارد (Huang et al. 2023). بخش زیادی از کلسیم (بر خلاف دیگر عناصر غذایی پرمصرف) در دیواره سلولی بافت‌های گیاهی قرار دارد که به علت وجود جایگاه‌های زیاد برای قرار گرفتن آن در دیواره‌های سلولی و همچنین انتقال بسیار کم کلسیم از غشای سیتوپلاسم و ورود آن به سیتوپلاسم سلول است. در تیغه میانی دیواره سلولی، کلسیم به شدت به گروه‌های کربوکسیل در اسید گالاکتورونیک (پکتین‌ها) می‌چسبد و تقریباً غیرقابل تبادل است. در بیشتر دولپه‌ای‌ها از جمله مرکبات، تقریباً ۵۰ درصد از کلسیم به شکل پکتات‌های کلسیم است. تجزیه پکتات‌ها، توسط آنزیم پلی‌گالاکتوروناز انجام می‌شود و غلظت بالای کلسیم در بافت‌ها به شدت از فعالیت این آنزیم جلوگیری می‌کند. در مقابل، در بافت‌های دارای کمبود کلسیم، فعالیت این آنزیم افزایش می‌یابد. بنابراین مقدار پکتات کلسیم در دیواره‌های سلولی گیاهان و میوه‌ها، در حساسیت این بافت‌ها به آلودگی‌های قارچی بسیار مؤثر است. با افزایش کلسیم بافت‌ها، حساسیت آن‌ها به آلودگی‌های قارچی و خسارت ناشی از تنش‌های محیطی کاهش می‌یابد. همچنین نتایج پژوهش‌های مختلف نشان داده است که با افزایش غلظت کلسیم در برگ، وزن دیواره سلولی نسبت به وزن برگ افزایش می‌یابد این افزایش نسبی

می‌یابد. به‌طور کلی، درختان با کمبود کلسیم میوه‌های کوچک، بد شکل با کیسه‌های عصاره چروکیده شده تولید می‌کنند. همچنین میوه‌های این درختان دارای مقدار عصاره کمتر اما اسید و مواد جامد محلول بیشتر هستند. کاهش اندازه برگ‌ها، گرد یا قلبی شکل شدن برگ‌ها، افزایش پوسیدگی ریشه‌ها، کاهش عملکرد و کاهش نسبی اندازه میوه‌ها از دیگر علائم ظاهری کمبود کلسیم است. به‌طور معمول برگ‌های دارای کمبود کلسیم، مقدار بیشتری پتاسیم و منیزیم دارند. کمبود کلسیم در برگ پرتقال، با توسعه کم‌رنگ شدن کلروفیل در طول حاشیه برگ‌ها و بین رگبرگ‌های اصلی و همچنین لکه‌های نکروتیک کوچک در ناحیه کم‌رنگ شده در سطح برگ مشخص می‌شود. اما در برگ لیمو، این کاهش کلروفیل به‌صورت بلوک‌های بزرگ سوخته شده ظاهر می‌شود. همچنین با کمبود کلسیم، ریزش برگ‌ها قبل از بلوغ رخ می‌دهد که به دنبال آن، برگ‌های جدید تولید می‌شوند که آن‌ها هم قبل از بلوغ ریزش می‌کنند. یکی از مهم‌ترین ناهنجاری‌های که با کمبود کلسیم ظاهر می‌شود کمبود منگنز است که بیشتر در زمستان و اوایل بهار مشاهده می‌شود. همه درختان دارای کمبود کلسیم معمولاً دارای سیستم ریشه‌ای ضعیف تر بوده و علائم کمبود منگنز را نشان می‌دهند که به علت کاهش ظرفیت ریشه این درختان برای جذب منگنز است. تحت شرایط کمبود کلسیم، حساسیت درختان مرکبات به تنش مانداب، پوسیدگی ریشه و تهویه نامناسب (کمبود اکسیژن) در منطقه ریشه افزایش می‌یابد. بنابراین پوسیدگی ریشه، رشد ضعیف و زوال تدریجی درختان می‌تواند یکی از علائم و نشانه‌های کمبود کلسیم باشد.

مهم‌ترین علائم ظاهری کمبود کلسیم در درختان مرکبات (Asadi Kangarshahi, 2019; Srivastava, 2013):

۱. مرگ مرستم‌های انتهایی اندام هوایی
۲. پوسیدگی مرستم‌های انتهایی ریشه
۳. زیادی ریزش میوه‌چه‌های جوان در اوایل مرحله اول رشد میوه
۴. کاهش رشد ریشه

دارد (White and Broadley, 2003; Gilliam et al. 2011).

ساختار میوه مرکبات و روند تغییرات کلسیم آن

میوه مرکبات شامل سه بخش پوست خارجی (فلایودو)^۲، پوست داخلی (آلبیدو)^۳ و گوشت (بخش خوراکی)^۴ است. ساختار پوست خارجی شامل واکس یا لایه روغنی است که خارجی‌ترین لایه پوست خارجی است و پس از آن به ترتیب کوتیکول، سلول‌های اپیدرمی و زیر اپیدرمی قرار دارند (شکل ۲). واکس یا لایه روغنی پس از تشکیل میوه بسیار نازک و به‌صورت جزیره‌ای است سپس به‌تدریج ضخیم‌تر و پیوسته‌تر خواهد شد و در فاصله زمانی کوتاهی پس از ریزش تابستانه تقریباً این لایه پیوسته و به حداکثر ضخامت می‌رسد پس‌ازآن، این واکس سطحی محدودکننده تعرق و در نتیجه محدودکننده انتقال کلسیم از طریق آوندهای چوبی به میوه و همچنین جذب کلسیم از طریق محلول‌پاشی خواهد شد. برش عرضی میوه مرکبات نشان می‌دهد که دستجات آوندی بیشتر در بخش پوست داخلی قرار دارند (شکل ۳) و با محدود شدن یا توقف تعرق از سطح میوه، تقریباً انتقال آب و عناصر غذایی از طریق آوند چوبی نیز به حداقل می‌رسد و متابولیت‌ها و آب مورد نیاز میوه بیشتر از طریق آوندهای آبکشی تأمین خواهد شد. به‌طورکلی انتقال کلسیم از ریشه به میوه مرکبات در آوندهای چوبی، تقریباً در فاصله کوتاهی پس از ریزش تابستانه میوه‌چه‌ها به حداقل رسیده یا متوقف می‌شود. همچنین به علت پیوستگی این لایه واکس و ضخامت آن، نفوذ مستقیم عناصر غذایی از طریق محلول‌پاشی مستقیم به سطح میوه نیز به حداقل خواهد رسید. بنابراین محلول‌پاشی کلسیم در مرحله اول رشد میوه و در اوایل مرحله دوم رشد میوه می‌تواند در افزایش کلسیم میوه‌ها مؤثر باشد و با فاصله گرفتن از مرحله دوم رشد میوه، به‌تدریج راندامان جذب کلسیم کم و کمتر می‌شود و تأثیر چندانی در افزایش کلسیم میوه‌ها نخواهد داشت (Storey and Treeby, 2002;)

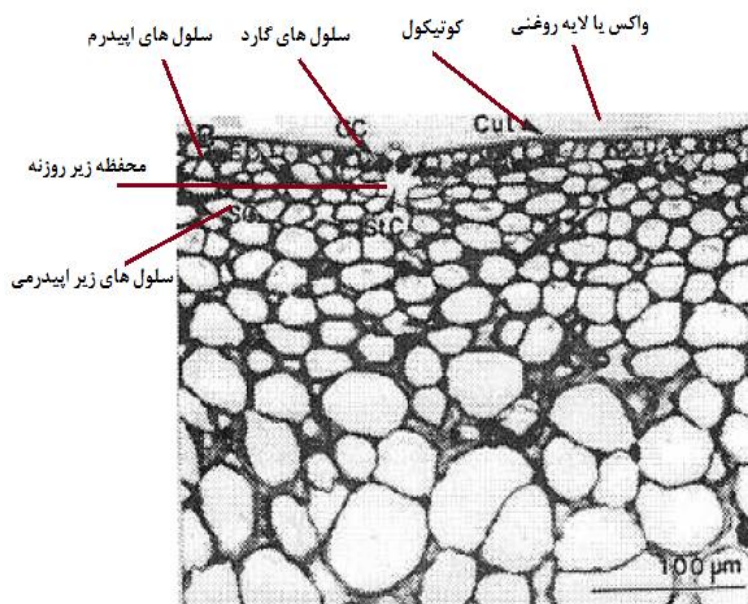
وزن دیواره سلول، استحکام بافت‌ها در مقابل تنش‌های زنده و غیر زنده را افزایش می‌دهد (White and Broadley, 2003; Demarty et al. 1984).

کلسیم و پایداری غشای سلولی

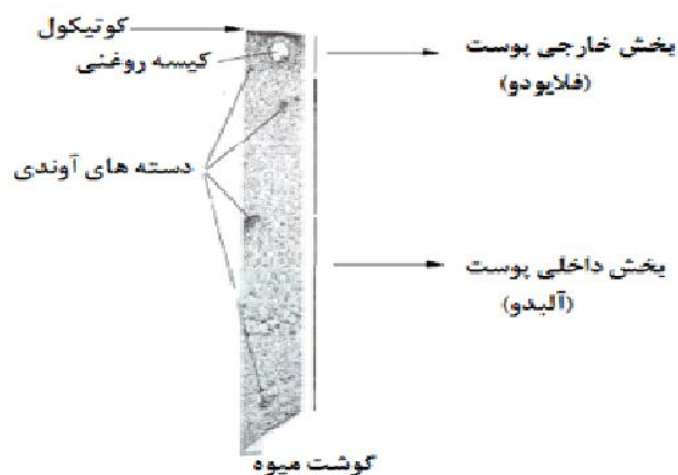
پیوند کلسیم با گروه‌های فسفات و کربوکسیلات فسفولیپیدها و همچنین پروتئین‌ها در سطح غشاهای سلولی موجب افزایش پایداری غشاهای سلولی می‌شود. این کلسیم می‌تواند با دیگر کاتیون‌ها مانند پتاسیم، منیزیم و سدیم جایگزین شود ولی هیچ‌یک از این کاتیون‌ها نمی‌توانند نقش کلسیم را در پایداری غشای سلولی انجام دهند. بنابراین در کمبود شدید کلسیم، ساختمان غشا آسیب‌دیده و نفوذپذیری آن افزایش می‌یابد. همچنین در بافت‌هایی که کمبود کلسیم دارند به علت نشت مواد تنفسی از واکوئل‌ها به سیتوپلاسم، فعالیت آنزیم‌های تنفسی و در نتیجه شدت تنفس افزایش می‌یابد (Marschner, 1995). کلسیم در زنجیره‌های پکتیکی تیغه میانی موجب سفتی و استحکام دیواره سلولی می‌شود. از طرف دیگر برای رشد سلول، دیواره سلولی باید نرم و شل شود. بنابراین با افزایش تولید هورمون اکسین، آپوپلاسم اسیدی شده و کلسیم با پروتون جایگزین می‌شود و در نتیجه زنجیره‌های پکتیکی روی همدیگر لغزیده و دیواره سلولی شل شده و رشد و بزرگ شدن سلول ایجاد می‌شود. همچنین کلسیم برای ورود مواد به ساختمان دیواره‌های سلولی ضروری است (Bramlage, 1994; Marschner, 1995; Zhang et al., 2019). بخش عمده کلسیم در سلول‌ها (به‌ویژه در سلول‌های برگ) در واکوئل‌ها قرار دارد و به‌عنوان یون همراه، برای آنیون‌های آلی و معدنی عمل می‌کند و در موازنه کاتیون - آنیون نقش دارد. همچنین تشکیل اگزالات کلسیم در واکوئل‌ها در پایین نگه‌داشتن غلظت کلسیم در سیتوپلاسم و کلروپلاست مؤثر است. اگزالات کلسیم نیز به علت حلالیت کم، در تنظیم اسمزی سلول‌ها اهمیت زیادی

چوبی و انتقال آن به میوه مرکبات با شدت تعرق اندام هوایی ارتباط دارد و با افزایش میزان تعرق که موجب افزایش جریان و حرکت شیر خام در آوند چوبی می‌شود، انتقال کلسیم به اندام هوایی نیز افزایش می‌یابد. اما شدت ورود کلسیم به میوه به مرحله رشدی میوه بستگی دارد در مراحل اولیه رشد میوه (تشکیل میوه تا ریزش فیزیولوژی) به علت وجود تعداد زیاد استومات‌ها و همچنین عدم وجود یا عدم تشکیل کامل واکس سطحی (لایه روغنی) در سطح میوه، شدت جریان تعرق از میوه نسبتاً زیاد است که انتقال و ورود کلسیم به میوه را افزایش می‌دهد. اما به‌طور کلی انتقال کلسیم به میوه ممکن است تحت تأثیر پایه، میوه یا میکروکلیمای درخت و همچنین درجه حرارت، رطوبت نسبی و بارندگی منطقه نیز باشد (Asadi Kangarshahi and Akhlaghi Amiri, 2018; Hocking et al., 2016).

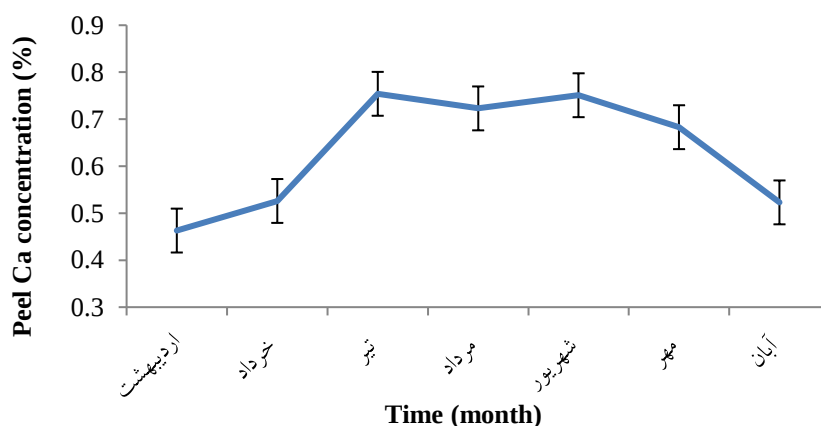
Asadi Kangarshahi, 2021). نتایج اندازه‌گیری غلظت کلسیم میوه‌چه‌های درختان تامسون ناول در اواخر اردیبهشت‌ماه نشان داد که غلظت کلسیم در میوه‌چه‌های بیرون تاج بیشتر از میوه‌چه‌های درون تاج بود. نتایج بررسی روند تغییرات کلسیم در پوست میوه در طی فصل رشد نشان داد که غلظت کلسیم در میوه‌چه‌های بخش بیرونی تاج درختان با گذشت زمان به تدریج افزایش یافت و در تیرماه به حداکثر رسید و از تیر تا شهریورماه از نوسان کمتری برخوردار بود، سپس غلظت کلسیم شروع به کاهش کرد و در زمان برداشت به حداقل مقدار کاهش یافت (شکل ۴). در میوه‌های درون تاج نیز غلظت کلسیم پوست میوه پس از تشکیل میوه به تدریج افزایش یافت. در تیرماه به حداکثر رسید سپس از تیر تا مردادماه از نوسان کمتری برخوردار بود و از شهریورماه مجدداً شروع به کاهش کرد و در آبان ماه به حداقل رسید (شکل ۵). نتایج پژوهش‌های متعدد نشان داده است که جذب و انتقال کلسیم در آوندهای



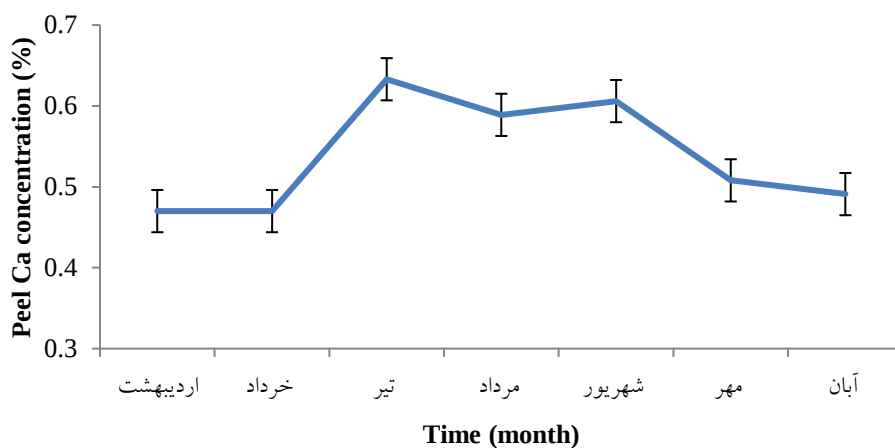
شکل ۲- ساختار پوست خارجی (فلاودو) میوه مرکبات
Figure 2- Peel exocarp (flavedo) stratural of citrus fruit



شکل ۳- ساختار مقطع عرضی پوست میوه مرکبات
Figure 3- Peel cross-section structural of the citrus fruit



شکل ۴- روند تغییرات غلظت کلسیم در پوست میوه پرتقال تامسون ناول (بیرون تاج) در طول فصل رشد
Figure 4-Change trend of Peel Ca concentration in 'Thomson' navel orange (outside the crown) during the growing season



شکل ۵- روند تغییرات غلظت کلسیم در پوست میوه پرتقال تامسون ناول (درون تاج) در طول فصل رشد
Figure 5 -Change trend of Peel Ca concentration in 'Thomson' navel orange (within the crown) during the growing season

پاسخ درختان مرکبات به کوددهی کلسیم

نتایج پژوهش‌های میدانی محلول‌پاشی نیتрат کلسیم (پس از تشکیل میوه، قبل از ریزش فیزیولوژیک میوه‌چه‌ها و در اواخر مرحله دوم رشد میوه) نشان داده است که بیشترین عملکرد، قطر و وزن میوه از تیمارهای محلول‌پاشی نیترات کلسیم پس از تشکیل میوه و قبل از ریزش فیزیولوژی (ریزش تابستانه) حاصل شد و محلول‌پاشی در اواخر فاز دوم رشد میوه تأثیر معنی‌داری در عملکرد، قطر و وزن میوه نداشت اما بیشترین قطر پوست میوه و ویتامین ث به ترتیب از تیمارهای محلول‌پاشی پس از تشکیل میوه و قبل از ریزش فیزیولوژی میوه به‌دست آمد و کمترین قطر پوست و ویتامین ث از تیمار محلول‌پاشی در اواخر فاز دوم رشد میوه حاصل شد که تفاوت معنی‌داری با تیمار شاهد نداشت (جدول‌های ۴

و ۵). همچنین نتایج نشان داد که محلول‌پاشی نیترات کلسیم تأثیری در چگالی عصاره، اسیدیته کل و مواد جامد محلول نداشت. بیشترین pH عصاره میوه از تیمار محلول‌پاشی قبل از ریزش فیزیولوژی (ریزش تابستانه) حاصل شد و بین سایر تیمارها تفاوت معنی‌داری وجود نداشت (اسدی کنگرشاهی، ۱۳۹۸؛ اسدی کنگرشاهی و اخلاقی امیری، ۱۳۹۷). نتایج محلول‌پاشی نیترات کلسیم در مراحل کلیدی فنولوژی رشد میوه نشان داد که محلول‌پاشی پس از تشکیل میوه و محلول‌پاشی قبل از ریزش فیزیولوژی (ریزش تابستانه) بیشترین تأثیر را در افزایش کلسیم پوست میوه پرتقال تامسون ناول داشتند. اما تأثیر محلول‌پاشی نیترات کلسیم در اواخر فاز دوم رشد میوه بر افزایش غلظت کلسیم پوست میوه کمتر از محلول‌پاشی پس از تشکیل میوه و قبل از ریزش فیزیولوژی (ریزش تابستانه) بود (شکل ۶).

جدول ۴- تأثیر محلول‌پاشی نیترات کلسیم بر برخی ویژگی‌های کمی و کیفی میوه پرتقال تامسون ناول

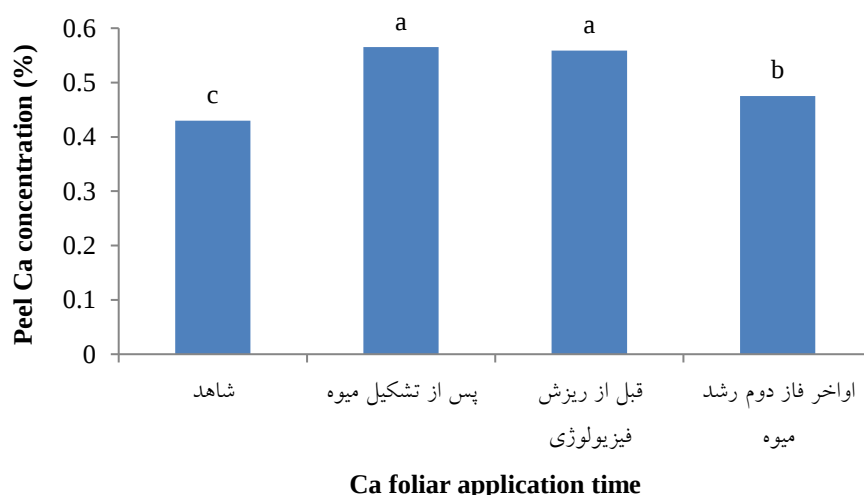
Table 4- Effect of calcium nitrate foliar application on yield and quality of 'Thomson' navel orange

چگالی میوه (گرم بر سانتی‌متر مکعب) Fruit density (g/cm ³)	وزن میوه (گرم) Fruit weight (g)	قطر پوست (میلی متر) Diameter peel (mm)	قطر میوه (میلی‌متر) Diameter fruit (mm)	عملکرد (تن در هکتار) Yield (ton/ha)	زمان مصرف کلسیم Ca application time
1.012 a	290.13 b	2.80 c	73.94 b	24.12 b	شاهد control
1.014 a	308.36 a	3.89 a	78.61 a	25.68 a	پس از تشکیل میوه After post setting
1.012 a	308.04 a	3.41b	78.53 a	25.23 a	اواخر مرحله اول رشد میوه Late of the first (I) stage of fruit growth
1.013 a	291.93 b	2.82 c	74.44 b	24.32 b	اواخر فاز دوم رشد میوه Late of the second (II) stage of fruit growth

جدول ۵- تأثیر محلول پاشی نیترات کلسیم بر برخی ویژگی‌های کیفی عصاره میوه پرتقال تامسون ناول

Table 5- Effect of calcium nitrate foliar application on some quality properties of 'Thomson' navel orange

چگالی عصاره میوه (گرم بر سانتی‌متر مکعب) Fruit extract density (g/cm ³)	اسیدیته کل Total acidity (mg/100ml)	ویتامین ث Vitamin C (mg/100ml)	مواد جامد محلول (درصد) TTS (%)	pH	زمان مصرف کلسیم Ca application time
0.914 b	1.35 a	67.45 c	9.77 a	3.08 b	شاهد control
0.915 b	1.34 a	83.92 a	9.34 a	3.08 b	پس از تشکیل میوه After post setting
0.921 a	1.33 a	78.89 b	9.33 a	3.25 a	اواخر مرحله اول رشد میوه Late of the first (I) stage of fruit growth
0.915 b	1.35 a	69.75 c	9.67 a	3.09 b	اواخر فاز دوم رشد میوه Late of the second (II) stage of fruit growth



شکل ۶- تأثیر محلول پاشی نیترات کلسیم در مراحل کلیدی فنولوژی بر غلظت کلسیم پوست میوه
Figure 6- Effect of calcium nitrate foliar application on Ca peel in the main phonological stage

فراهمی کلسیم و فعالیت ریشه‌ها برای جذب آن تعیین می‌شود. بیشترین جذب کلسیم توسط آپوپلاست نوک ریشه‌ها و مناطق رشدی ریشه‌های جانبی (آنجایی که فاقد حلقه کاسپارین هستند یا حلقه کامل نشده) به‌طور غیرفعال انجام می‌شود. در این حالت، رشد ریشه با افزایش تعداد نوک ریشه‌ها و همچنین ریشه‌های جانبی، موجب حرکت آپوپلاسمی بیشتر کلسیم به درون سیستم ریشه شده و در نتیجه جذب کلسیم را افزایش می‌دهند. اگرچه جذب کلسیم توسط ریشه، ممکن است به مقدار کمی توسط جریان سیمپلاست نیز انجام شود. علاوه بر این، جذب کلسیم در ریشه تحت تأثیر رقابت بین کلسیم و قابلیت

به‌طورکلی حساسیت درختان مرکبات به ناهنجاری کمبود کلسیم تحت تأثیر ژنتیک، عوامل محیطی و توزیع کلسیم سلولی است. در درختان میوه آوندهای چوبی و نسبت آوندهای چوبی به آوندهای آبکشی در انتقال کلسیم به ارگان‌های مصرفی و در نتیجه مقدار و غلظت کلسیم در اندام‌های با تعلق پایین (به‌ویژه میوه‌ها و ...) مؤثر است. نسبت کلسیم به رادیکال‌های آزاد اکسیژن نیز در توسعه و شدت ناهنجاری‌های کلسیم مؤثر است. به‌طورکلی تجمع کلسیم در بافت برگ و میوه به رقم و همچنین ویژگی‌های خاص میوه و برگ بستگی دارد. در مورد نوع رقم، انتقال کلسیم به برگ یا میوه توسط قابلیت

(متناسب با رقم و شرایط اقلیمی) جریان آوندهای چوبی به این اندام‌ها حداقل شده و بیشتر آب مورد نیازشان از طریق آوندهای آبکشی تأمین می‌شود لذا مدیریت بهینه کف باغ و مدیریت مصرف کلسیم در مرحله اول و اوایل مرحله دوم رشد میوه در تأمین و افزایش غلظت کلسیم در میوه‌ها بسیار مؤثر است.

مدیریت کوددهی باغ و جذب کلسیم

نیتروژن: مصرف زیاد نیتروژن حساسیت میوه‌ها را به ناهنجاری‌های کمبود کلسیم افزایش می‌دهد. مصرف زیاد نیتروژن موجب تشدید رشد رویشی می‌شود. نظر به این‌که کلسیم با آب در جریان تعرق حرکت می‌کند لذا سطح ویژه بیشتر برگ‌ها، موجب حرکت و انتقال بیشتر آب و کلسیم به برگ‌ها نسبت به میوه‌ها می‌شود در نتیجه مقدار کلسیم میوه‌ها کاهش می‌یابد. از طرف دیگر کوددهی نیتروژن همچنین موجب افزایش اندازه میوه می‌شود که به‌طور غیرمستقیم موجب افزایش توسعه ناهنجاری‌های کمبود کلسیم می‌شود. میوه‌های با غلظت زیاد نیتروژن همچنین تنفس و میزان تولید اتیلن بیشتری پس از برداشت خواهند داشت که مراحل رسیدن و پیری آن‌ها را تشدید می‌کند و این غلظت زیاد نیتروژن در میوه‌ها، به‌احتمال زیاد مکانیسم‌های که موجب ناهنجاری‌های کمبود کلسیم می‌شوند را تشدید می‌کند. علاوه بر مقدار کل نیتروژن، شکل نیتروژن مصرفی نیز بر کیفیت میوه‌ها تأثیر دارد کوددهی خاکی با آمونیم بیشتر از نترات بر مقدار کلسیم میوه‌ها تأثیر دارد از آنجایی‌که بین آمونیم و کلسیم برهمکنش منفی برای جذب توسط ریشه‌ها وجود دارد بنابراین مصرف زیاد کودهای آمونیومی در منطقه ریشه جذب کلسیم را کاهش می‌دهد. به‌هرحال، آمونیم در لایه‌های سطحی خاک به‌سرعت تبدیل به نترات می‌شود. اما به‌طورکلی نتایج پژوهش‌های متعدد نشان داده است که مقدار کل نیتروژن مصرفی در خاک بسیار بیشتر از شکل نیتروژن مصرفی در افزایش ناهنجاری کمبود کلسیم تأثیر دارد. مصرف زیاد کودهای سولفات آمونیم جذب و انتقال کلسیم به اندام هوایی را کاهش می‌دهند. به‌طورکلی مصرف زیاد کودهای

استفاده دیگر یون‌ها در محلول خاک نیز است. بنابراین قابلیت استفاده دیگر عناصر غذایی در خاک نیز بر جذب کلسیم و در نتیجه حساسیت برگ و میوه به ناهنجاری‌های کمبود کلسیم تأثیر دارد (Freitas and Mitcham, 2012). کلسیم پس از جذب توسط ریشه‌ها، توسط جریان توده‌ای در پاسخ به شیب پتانسیل آبی ناشی از تعرق میوه‌ها، برگ‌ها و همچنین رشد آن‌ها، در آوندهای چوبی به طرف برگ‌ها و میوه‌ها حرکت می‌کند. برگ‌های بالغ تعرق بیشتری از برگ‌های جوان و میوه‌ها دارند که موجب تجمع بیشتر کلسیم در آن بافت‌ها می‌شود. بر این اساس، رطوبت نسبی بالای محیط، ممکن است موجب جذب و انتقال بیشتر کلسیم به میوه‌ها و اندام‌های مریستمی یا برگ‌های داخلی با تعرق کمتر شوند. علاوه بر این، برگ‌های بالغ آب را به‌طور انحصاری از آوندهای چوبی دریافت می‌کنند اما برگ‌های جوان و میوه‌ها آب را هم از آوندهای چوبی و هم از آوندهای آبکشی دریافت می‌کنند. با توجه به این‌که کلسیم فقط توسط آوندهای چوبی در گیاهان حرکت می‌کند لذا جذب آب از آوند آبکشی، ظرفیت جذب کلسیم توسط شیره آوند چوبی به برگ‌های جوان و میوه‌ها را بیشتر (در مقایسه با برگ‌های بالغ) کاهش می‌دهد (Wallace and Mueller, 1980; Asadi). چنین رفتاری در دیگر اندام‌ها مانند نواحی مریستمی نیز وجود دارد که تعرق کمتری دارند و آب مورد نیازشان از هر دو آوند چوبی و آبکشی دریافت می‌کنند که موجب می‌شود این اندام‌ها، حساسیت زیادی به ناهنجاری‌های کمبود کلسیم داشته باشند. البته میوه‌های مرکبات، در بخش خارجی پوست‌شان یک لایه واکس دارند این لایه واکس، پس از تشکیل میوه در اوایل بهار بسیار نازک و به‌صورت قطعات ناپیوسته است که به‌تدریج ضخیم‌تر و پیوسته‌تر می‌شود و تقریباً در فاصله زمانی حدوداً ۴۵ تا ۵۰ روز پس از تشکیل میوه، میوه‌چه‌ها حداکثر تعرق دارند در نتیجه بیشتر آب مورد نیازشان از طریق آوندهای چوبی به این اندام‌ها منتقل می‌شود اما به‌طورکلی پس از گذشت حدود ۱۰۰ روز

نیتروژنی موجب تحریک رشد رویشی سرشاخه‌ها (به‌ویژه در فاز اول رشد میوه) شده و بیشتر کلسیم انتقالی در شیره خام به این نقاط در حال رشد وارد می‌شود و کمبود کلسیم را در میوه‌چه‌ها تشدید می‌کند (Taylor and Locascio, 2004; Olle and Bender, 2009). به‌طور کلی برای کوددهی نیتروژن توصیه می‌شود که باغداران، مصرف آن را قبل از توسعه برگ‌ها و گلدهی در شروع و اوایل فصل را متوقف کنند یا حداکثر پنج الی ۱۰ درصد نیاز سالانه درختان در مرحله رشد و توسعه سرشاخه‌های بهاره گلدهی شروع نمایند. پس از ریزش گلبرگ‌ها و تشکیل میوه به‌تدریج مقدار مصرف نیتروژن (درصدی از نیاز سالانه) را افزایش داده و در نیمه دوم مرحله اول رشد تا اواسط مرحله دوم رشد میوه (با توجه به رقم) به حداکثر مقدار مصرف ارتقا دهند. سپس به‌تدریج مصرف نیتروژن به حداقل مقدار کاهش دهند یا متوقف کنند و مجدداً پس از برداشت، کوددهی نیتروژن جهت افزایش ذخیره نیتروژن اندام‌های دائمی انجام دهند (Asadi Kangarshahi and Akhlaghi Amiri, 2023).

پتاسیم و منیزیم: کوددهی زیاد پتاسیم و منیزیم نیز ممکن است ناهنجاری‌های کمبود کلسیم را افزایش دهند. معمولاً غلظت پتاسیم، منیزیم و کلسیم در ریشه و برگ‌های مسن بالاست نظر به این‌که پتاسیم به‌آسانی در داخل گیاهان جابجا و توزیع مجدد می‌شود بنابراین میوه‌ها و اندام‌های مریستمی مشکلی از نظر فراهمی پتاسیم ندارند. اما غلظت منیزیم و به‌ویژه کلسیم در بافت‌های مانند میوه‌ها و برگ‌های جوان که از آوند آبکش تغذیه می‌کنند اغلب پایین است. به‌علاوه در شروع توسعه سلولی میوه‌ها، اغلب با اختلال در عمل آوندهای چوبی شروع می‌شود و ممکن است منجر به کاهش جذب کلسیم میوه‌ها شود درحالی‌که عملکرد دستگاه آوند آبکشی نسبت به آوند چوبی تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند که مناسب فراهمی و انتقال پتاسیم به میوه‌ها است. که موجب افزایش غلظت پتاسیم در میوه‌ها می‌شود. معمولاً از نسبت بالای پتاسیم به کلسیم، منیزیم به کلسیم یا پتاسیم و منیزیم به کلسیم در میوه‌ها برای پیش‌بینی

ناهنجاری‌های کمبود کلسیم استفاده می‌شود. پتاسیم و منیزیم با کلسیم برای محل‌های پیوند در سطح غشا پلاسمایی رقابت می‌کنند اما این عناصر نمی‌توانند نقش کلسیم را در ساختمان و پایداری غشا داشته باشند در نتیجه کلسیم کمتری برای پیوند به غشای پلاسمایی وجود خواهد داشت و کمبود کلسیم در غشاها، موجب افزایش نشت-پذیری آن‌ها شده و منجر به نشت مواد متابولیکی و سرانجام پلاسمولیز، شکست غشاها و مرگ سلول‌ها خواهد شد. اثر منیزیم در جذب کلسیم به مقدار نسبی کلسیم و منیزیم در محلول خاک بستگی دارد. اگر مجموع غلظت کلسیم به‌علاوه منیزیم در محلول خاک، کمتر از ۲۰ میلی‌مول در لیتر باشد معمولاً نسبت جذب کلسیم به منیزیم، مشابه نسبت غلظت آن‌ها در محلول خاک خواهد بود و با افزایش تبخیر و تعرق، نسبت جذب منیزیم به کلسیم افزایش می‌یابد. اما در محلول‌های با غلظت کم (کمتر از یک میلی‌مول در لیتر)، جذب کلسیم بیشتر توسط فعالیت‌های متابولیکی کنترل می‌شود (Wallace and Mueller, 1980; Taylor and Locascio, 2004). به‌طور کلی برای افزایش راندمان جذب پتاسیم و منیزیم و کاهش رقابت با کلسیم، توصیه می‌شود که باغداران، کوددهی پتاسیم و منیزیم را متناسب با فنولوژی رشد میوه از اواسط تا اواخر مرحله اول شروع نمایند و در مرحله دوم رشد میوه به حداکثر مقدار مصرف ارتقا داده شود (Asadi Kangarshahi and Akhlaghi Amiri, 2024).

بور: بور اثر هم‌افزایی با کلسیم دارد و موجب افزایش غلظت کلسیم در میوه‌ها می‌شود و ناهنجاری‌های کمبود کلسیم را کاهش می‌دهد. بور همچنین ممکن است فعالیت آنزیم ایندول استیک اسید اکسیداز را متوقف یا کاهش دهد که می‌تواند موجب افزایش ایندول استیک اسید و در نتیجه بهبود حرکت کلسیم در آوندهای چوبی و همچنین تحریک تمایز آوندهای چوبی در دم میوه شود. بنابراین جذب کلسیم توسط میوه‌ها را تسهیل می‌کند. کوددهی خاکی بور همچنین وزن خشک ریشه‌های فیبری و ریز را افزایش می‌دهد ریشه‌های که بیشترین جذب

کلسیم را انجام می‌دهند. به‌طور کلی گزارش‌های مختلف نشان داده است که بور همچنین نقش مهمی در پایداری ساختمانی و کارکردی غشا دارد (Xuan et al. 2005; Asadi Kangarshahi, 2021).

به‌طور کلی کاتیون‌ها جذب و توزیع کلسیم را کاهش می‌دهند درحالی‌که آنیون‌ها، توسعه علائم کمبود ناشی از کمبود کلسیم را کاهش می‌دهند. مصرف زیاد نیتروژن موجب افزایش رشد میوه، کاهش غلظت کلسیم در بافت آن و افزایش احتمال ناهنجاری‌های ناشی از کمبود کلسیم می‌شود. همچنین وجود غلظت زیاد کاتیون‌های سدیم، پتاسیم، آمونیم، منیزیم و یون هیدروژن در محلول خاک، جذب و توزیع کلسیم را کاهش می‌دهند. بررسی تأثیر آنیون‌های نیترات، کلر، سولفات و بی‌کربنات در ایجاد ناهنجاری‌های کمبود کلسیم نشان داد که یون کلر بیشترین تأثیر در افزایش کمبود و ناهنجاری‌های ناشی از کمبود کلسیم را دارد که عمدتاً ناشی از کاهش انتقال کلسیم به اندام هوایی (تا غلظت ناکافی کلسیم در محیط ریشه) و بافت‌های در حال توسعه است بنابراین زیادی یون‌های محلول در محیط ریشه می‌تواند در جذب کلسیم اختلال ایجاد کنند غلظت زیاد منگنز در محلول خاک و سطح ریشه‌ها موجب کاهش جابجایی کلسیم به اندام هوایی و کاهش غلظت کلسیم در برگ‌ها می‌شود. مصرف زیاد کودهای پتاسیم و آمونیوم و افزایش غلظت پتاسیم و آمونیوم در محلول خاک، جذب کلسیم توسط ریشه‌ها را به شدت کاهش می‌دهد. در شرایط و غلظت یکسان، اثر آمونیوم در کاهش جذب کلسیم بیشتر از پتاسیم است (Olle and Bender, 2009).

تنظیم‌کننده‌های رشد و جذب کلسیم

برخی تنظیم‌کننده‌ای رشد با ناهنجاری‌های کمبود کلسیم ارتباط دارند که به احتمال زیاد به علت نقش آن‌ها در انتقال و توزیع کلسیم در بافت‌ها و سلول‌ها است. تنظیم‌کننده‌های رشد در رشد ریشه، فعالیت ریشه و جذب کلسیم تأثیر دارند. انتقال اکسین از مناطق انتهایی به سمت ریشه و میزان اکسین ریشه، مسئول افزایش رشد و فعالیت ریشه

است که موجب افزایش فعالیت ریشه و جذب کلسیم می‌شود. سیتوکینین‌ها نیز موجب بهبود تمایز سلول‌ها در ریشه می‌شوند و می‌توانند جذب کلسیم توسط ریشه‌ها را افزایش دهند. جیبرلین‌ها با افزایش ترجمه بازدارنده‌های چرخه سلولی، مانع تقسیم سلولی و رشد می‌شوند لذا موجب کاهش جذب کلسیم توسط ریشه‌ها و کاهش تجمع کلسیم در میوه‌ها، مریستم‌ها و برگ‌ها می‌شوند. بنابراین این تنظیم‌کننده‌های رشد بر جذب کلسیم توسط ریشه، میزان کلسیم گیاه و در نتیجه حساسیت میوه‌ها به ناهنجاری‌های کمبود کلسیم تأثیر دارند. با توجه به این‌که کلسیم عمدتاً در آوندهای چوبی حرکت می‌کند لذا تعداد این آوندها در حرکت و انتقال کلسیم به میوه‌ها مؤثر است و افزایش تعداد این آوندها می‌تواند پتانسیل حساسیت میوه‌ها را به ناهنجاری‌های کمبود کلسیم کاهش دهند. تنظیم‌کننده‌های رشد در کنترل تمایز بافت‌های آوندی نقش دارند به‌طوری که تمایز آوندهای چوبی با انتقال اکسین از مناطق انتهایی به سمت پایه (برگ و میوه) شروع می‌شود و با حضور سیتوکینین افزایش می‌یابد.

برخی مطالعات نیز نشان داده است که تمایز آوند چوبی با نسبت بالای اکسین به جیبرلین شروع می‌شود درحالی‌که نسبت‌های پایین اکسین به جیبرلین موجب پایداری توسعه آوندهای چوبی می‌شوند. جیبرلین‌ها همچنین محرک انقباض سلولی هستند که منجر به انقباض آوندهای چوبی در طول مراحل انقباض سریع میوه می‌شوند که در نتیجه موجب کاهش جذب کلسیم توسط میوه‌ها و افزایش حساسیت آن‌ها به ناهنجاری‌های کمبود کلسیم می‌شوند. تیمار اسید آبسزیک موجب پایداری تعداد بیشتری از آوندهای چوبی و نسبت بالاتر آوند چوبی به آوند آبکشی برای جذب آب در میوه‌ها می‌شود که می‌تواند موجب جذب کلسیم بیشتر و حساسیت کمتر میوه‌ها به ناهنجاری‌های کمبود کلسیم شود. تعرق برگ توسط باز شدن استومات‌ها در پاسخ به مقدار اسید آبسزیک در برگ‌ها تنظیم می‌شود. مطالعات نشان داده است که تیمار کل گیاهان با اسید آبسزیک می‌تواند به‌طور ویژه موجب بسته شدن

استومات‌ها و در نتیجه کاهش تعرق برگ و کل گیاه شود بدون این‌که بر تعرق میوه تأثیری داشته باشد. بسته شدن روزنه‌های برگ، جریان شیره آوند چوبی و جذب کلسیم به برگ‌های بالغ را کاهش می‌دهد در مقابل جریان شیره خام و جذب کلسیم را به درون میوه‌ها را افزایش می‌دهد که حساسیت میوه‌ها را به ناهنجاری‌های کمبود کلسیم را تحت شرایط تنش کلسیم را کاهش می‌دهد. بنابراین شرایط محیطی مناسب برای تعرق زیاد در برگ‌های بالغ، موجب افزایش تلفات آب و تشدید تنش آبی می‌شود که موجب کاهش جریان شیره خام به درون میوه‌ها و جذب کلسیم توسط میوه‌ها و در نتیجه افزایش حساسیت میوه‌ها به ناهنجاری کمبود کلسیم می‌شود. سرعت رشد برگ و میوه توسط فرآیندهای تقسیم سلولی و توسعه سلولی تعیین می‌شود که توسط تنظیم‌کننده‌های رشد در این بافت‌ها کنترل می‌شوند (Lemtiri and Macrobbe, 1994; Lecourieux et al. 2006).

به‌طور کلی بافت‌های که معمولاً بیشترین توسعه و سرعت رشدشان هم‌زمان با جذب کلسیم کمتر باشد به دلیل افزایش رقت کلسیم، این بافت‌ها به ناهنجاری‌های ناشی از کمبود کلسیم حساس‌تر هستند. بنابراین بافت‌های انتهایی در برگ‌ها و میوه‌ها به علت سرعت رشد بیشتر و دریافت کمتر کلسیم (به علت تعرق کمتر) حساسیت بیشتری به ناهنجاری‌های کمبود کلسیم دارند. جیبرلین‌ها، توسعه سلولی را تسریع می‌کنند بنابراین مصرف خارجی

آن‌ها موجب کاهش جذب کلسیم و رقیق شدن کلسیم در برگ‌ها و میوه‌ها می‌شود و حساسیت این بافت‌ها به ناهنجاری‌های کمبود کلسیم را افزایش می‌دهد. اثر اسید آبسزیک در جلوگیری یا کاهش ناهنجاری کمبود کلسیم نیز به اثر تضادی آن در پاسخ‌های اسید جیبرلیک است که جذب کلسیم برگ و میوه را محدود می‌کند. در سطح سلولی، تنظیم‌کننده‌های رشد با تنظیم تقسیم سلولی و احتمالاً تنظیم پاسخ‌های سلولی با توسعه علائم، در حساسیت بافت‌ها به ناهنجاری‌های کمبود کلسیم تأثیر دارند (Freitas et al., 2011 & 2012).

کوددهی خاکی کلسیم

مصرف کلسیم در خاک‌های اسیدی با pH کمتر از ۵/۵ به شکل کربنات کلسیم (آهک) برای افزایش pH به حدود ۶ تا ۶/۵ و حفظ pH خاک در این دامنه توصیه می‌شود. اگر pH خاک در دامنه ۶ تا ۶/۵ باشد نیازی به مصرف خاکی کودهای کلسیمی نیست مگر این‌که نتایج تجزیه خاک نشان دهد که کلسیم قابل استفاده خاک کمتر از مقدار کفایت است در این صورت، مصرف گچ یا کودهای محلول کلسیمی توصیه می‌شود. اگر pH خاک، بیشتر از ۶/۵ باشد معمولاً خاک کلسیم کافی دارد و نیازی به مصرف کودهای کلسیم نیست. در جدول ۶ برخی منابع کلسیم برای مصرف در خاک‌های شور و خاک‌های اسیدی آورده شده است.

جدول ۶- منابع کودی کلسیم برای مصرف خاکی (خاک‌های شور و اسیدی) درختان مرکبات

Table 6- Sources of calcium fertilizers for soil application (saline and acid soils) of citrus trees

(Asadi Kangarshahi, 2018)

کود Fertilize	فرمول شیمیایی Chemical formula	حلالیت در آب (کیلوگرم در ۱۰۰۰ لیتر) Solubility in water (kg/1000L)
سولفات کلسیم calcium sulfate	$\text{Ca SO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$	2.4
کربنات کلسیم calcium carbonate	Ca CO_3	0.047

کودآبیاری کلسیم

کود آبیاری، مصرف کودهای محلول با آب آبیاری است که به‌طور معمول توسط سامانه‌های تحت فشار

مانند آبیاری قطره‌ای انجام می‌شود. کودهای نترات کلسیم و کلرید کلسیم از معمول‌ترین کودهای کلسیمی محلول در آب هستند که می‌توانند توسط سیستم آبیاری برای

رس سیلتی، لوم رسی شنی، لوم رسی سیلتی و لوم رسی)، خاک های شور و خاک های در معرض تنش مانداب مصرف نیترات کلسیم به مقدار ۱۵۰ تا ۲۰۰ گرم به ازای هر درخت در دو مرحله به فاصله ۲۰ تا ۳۰ روز در میان در اواسط مرحله اول رشد میوه و اوایل مرحله دوم رشد میوه توصیه می شود (اسیدی کنگرشاهی، ۲۰۱۸).

درختان مرکبات مصرف می شوند (جدول ۷). کودهای تزریق شده به سیستم آبیاری باید کاملاً محلول باشند و هیچ گونه رسوبی ایجاد نکنند. معمولاً برای کودآبیاری از منابع کودی با حلالیت بالا استفاده می شود. برای درختان بارده (به ویژه درختان مسن) در خاک های با بافت سبک (شنی، شن لومی و لوم شنی) و سنگین (رسی، رس شنی،

جدول ۷- منابع کودی کلسیم برای کودآبیاری درختان مرکبات

Table 7- Sources of calcium fertilizers for fertigation of citrus trees (asadi Kangarshahi, 2018)

کود Fertilize	فرمول شیمیایی Chemical formula	وزن مولکولی (گرم بر مول) Molecular weight (g/mol)	حلالیت در آب (کیلوگرم در ۱۰۰۰ لیتر) Solubility in water (kg/1000L)
کربوکسیلات کلسیم Calcium carboxylate	$\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$	158.17	347
نیترات کلسیم Calcium nitrat	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2, 4\text{H}_2\text{O}$	236.09	1200
کلرید کلسیم Calcium chloride	$\text{CaCl}_2, 2\text{H}_2\text{O}$	146.86	745
کلات کلسیم Calcium chelate	CaEDTA	374.30	800
گلوکونات کلسیم Calcium gluconate	$\text{Ca}[\text{C}(\text{OH})(\text{CHOH})_5\text{COO}]_2$	490.43	-

محلول پاشی کلسیم

محلول پاشی کلسیم برای همه درختان بارده به ویژه ارقامی که میوه آن ها در انبار ذخیره می شود در اوایل مرحله اول رشد میوه (پس از تشکیل میوه و رسیدن قطر میوه چه ها به حدود ۵ تا ۱۰ میلی متر) و همچنین تکرار آن قبل از شروع ریزش تابستانه و در اوایل مرحله دوم رشد میوه ها با کودهای مناسب کلسیمی مانند نیترات کلسیم یا کودهای کلسیمی با بنیان آلی، برای افزایش اندازه، بهبود کیفی رنگ میوه، افزایش انبارمانی میوه و ... توصیه می شود (جدول ۸). محلول پاشی کلسیم در کاهش ناهنجاری های

ناشی از کمبود کلسیم مؤثر است ناهنجاری های مربوط به کمبود کلسیم معمولاً با عدم توانایی گیاهان برای انتقال کلسیم کافی به اندام های تحت تأثیر (میوه ها و ...) بیشتر از میزان ناکافی کلسیم در خاک ارتباط دارند. کلسیم یک عنصر نسبتاً غیر قابل متحرک در گیاهان است لذا محلول پاشی آن می تواند کمبود آن را رفع کند. در محلول پاشی کلسیم، پوشش کامل اندام های رشدی انتهایی جوان، میوه ها و در دیگر اندام های در حال توسعه در رفع کمبود کلسیم در این اندام ها بسیار مؤثر است و محلول پاشی اندام ها و برگ های مسن و قدیمی، تأثیری در رفع ناهنجاری کلسیم در اندام های جوان در حال توسعه و میوه ها ندارد (جدول ۹).

جدول ۸- منابع کودی کلسیم برای محلول‌پاشی درختان مرکبات

Table 8- Sources of calcium fertilizers for foliar application of citrus trees (asadi Kangarshahi, 2018)

حلالیت در آب (کیلوگرم در ۱۰۰۰ لیتر) Solubility in water (kg/1000L)	وزن مولکولی (گرم بر مول) Molecular weight (g/mol)	فرمول شیمیایی Chemical formula	کود Fertilize
347	158.17	$\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$	کربوکسیلات کلسیم Calcium carboxylate
1200	36.09	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2, 4\text{H}_2\text{O}$	نیتрат کلسیم Calcium nitrat
800	374.30	CaEDTA	کلات کلسیم Calcium chelate
-	490.43	$\text{Ca}[\text{C}(\text{OH})(\text{CHOH})_5\text{COO}]_2$	گلوکونات کلسیم Calcium gluconate

جدول ۹- محلول‌پاشی کلسیم برای درختان بارده مرکبات

Table 9- Calcium foliar application for citrus fruits trees

غلظت و نوع کود Fertilizer concentration and type	مرحله رشدی Growth stage	ردیف line
محلول‌پاشی نیترات کلسیم با غلظت سه تا پنج در هزار همراه با اوره با غلظت دو تا سه در هزار، اسید بوریک با غلظت دو تا سه در هزار و مویان مناسب محلول‌پاشی با غلظت نیم در هزار	پس از تشکیل میوه post setting	1
محلول‌پاشی نیترات کلسیم با غلظت پنج تا هفت در هزار همراه با اوره با غلظت دو تا سه در هزار، اسید بوریک با غلظت دو تا سه در هزار و مویان مناسب محلول‌پاشی با غلظت نیم در هزار	قبل از ریزش تابستانه Phisological drop (june drop)	2
محلول‌پاشی نیترات کلسیم با غلظت شش تا هشت در هزار همراه با اوره با غلظت دو تا سه در هزار، اسید بوریک با غلظت دو تا سه در هزار و مویان مناسب محلول‌پاشی با غلظت نیم در هزار	اوایل تا اواسط مرحله دوم رشد میوه Early to mid second stage (II) of fruit growth	3

اختلاط کودهای کلسیمی

منابع کودی کلسیم، امکان اختلاط آن با سایر کودهای شیمیایی و همچنین اختلاط‌هایی که موجب کاهش حلالیت و یا رسوب می‌شوند در جدول ۱۰ آورده شده است. باغداران می‌توانند از این جدول‌ها به‌عنوان جدول راهنما برای اختلاط کودهای کلسیمی با سایر کودهای شیمیایی برای کودآبیاری یا محلول‌پاشی استفاده نمایند. باغداران باید مراقب باشند زمانی که کودهای محلول فسفر توسط سامانه‌های آبیاری تحت فشار (مانند سیستم آبیاری قطره‌ای) مصرف می‌کنند اگر pH مخلوط آب و کود، اسیدی نباشد فسفر می‌تواند با کلسیم محلول

در آب آبیاری ترکیب شود و تشکیل یک ترکیب نامحلول بدهد که می‌تواند موجب مسدود شدن قطره‌چکان‌ها شود. به‌طور مشابه، زمانی که یک منبع کود با یون اصلی کلسیم مانند نیترات کلسیم در محلول مصرف شود، استفاده از هر شکلی از فسفات یا سولفات در آن محلول، اجتناب شود و از شکل‌های کلات شده، کمپلکس شده یا شکل نیترات عناصر غذایی کم مصرف آهن، منگنز، روی و مس به‌جای شکل سولفات آن‌ها استفاده شود. بنابراین در هنگام اختلاط کودها برای کودآبیاری یا محلول‌پاشی در تانک کود باید دقت شود که از کودهایی استفاده شود که امکان اختلاط داشته باشند و به اصطلاح، با هم سازگاری داشته باشند.

جدول ۱۰- سازگاری و امکان اختلاط کودهای کلسیمی با برخی کودها و ترکیبات شیمیایی معمول برای کود آبیاری و محلول پاشی
 Table 10- Compatibility and the possibility of mixing calcium fertilizers with some fertilizers and common chemical compounds for fertigation and foliar spraying (Asadi Kangarshahi and Akhlaghi Amiri, 2014)

کود Fertilizer	اوره Urea	نیترات آمونیم Ammonium nitrate	سولفات آمونیم Ammonium sulfate	نیترات پتاسیم Potassium nitrate	کلرید پتاسیم Potassium chloride	سولفات پتاسیم Potassium sulfate	فسفات آمونیم Ammonium phosphate	سولفات آهن Iron sulfate	سولفات منگنز Manganese sulfate
نیترات یا کلرید کلسیم Calcium nitrate or chloride	✓	✓	R	✓	✓	X	X	X	X
کود Fertilizer	سولفات روی Zinc sulfate	سولفات مس Copper sulfate	کلات‌های آهن Iron chelates	کلات‌های منگنز Manganese chelates	کلات‌های روی Zinc chelates	کلات‌های مس Copper chelates	سولفات منیزیم magnesium sulfate	اسید فسفریک Phosphoric acid	اسید سولفوریک Sulfuric acid
نیترات یا کلرید کلسیم Calcium nitrate or chloride	X	X	R	R	R	R	X	X	X

✓- سازگار (قابل اختلاط)، R- کاهش حلالیت، X- ناسازگار (غیرقابل اختلاط)
 ✓-compatible, R- reducing solubility, X- incompatible

کلسیم و تنش خشکی

تنش خشکی موجب کاهش رشد ریشه، کاهش جذب کلسیم و کاهش انتقال آن به اندام هوایی می‌شود. تنش آبی موجب کاهش شیب پتانسیل آبی بین ریشه‌ها با میوه‌ها و برگ‌های جوان در حال توسعه با تعرق کم می‌شود لذا انتقال کلسیم توسط آوندهای چوبی به این بافت‌ها را کاهش و حساسیت آن‌ها را به ناهنجاری‌های کمبود کلسیم افزایش می‌دهد. نقش سیگنالی کلسیم در کنترل حرکت روزنه‌ها نشان می‌دهد که برای باز بودن پایدار استومات‌ها، کلسیم باید از سیتوپلاسم سلول‌های نگهبان خارج شود در مقابل بسته شدن استومات‌ها با کلسیم زیاد در سیتوپلاسم تحریک می‌شود. باز بودن استومات‌ها برای جذب دی-اکسیدکربن و فتوسنتز ضروری است. به هر حال، جذب دی اکسیدکربن همراه با تلفات مقدار زیادی آب از گیاهان است بنابراین، باز و بسته شدن استومات‌ها در گیاهان طوری تنظیم شده است که برای جلوگیری از تلفات آب، استومات‌ها در تاریکی (موقعی که فتوسنتز انجام نمی‌شود) بسته هستند. خروج کلسیم از سلول‌های نگهبان موجب توقف بسته شدن سلول‌های استومات‌ها می‌شود و این ممکن است موجب تلفات آب غیرمولد و در نتیجه راندمان پایین آب مصرفی در محصولات خسارت دیده از کمبود کلسیم شود.

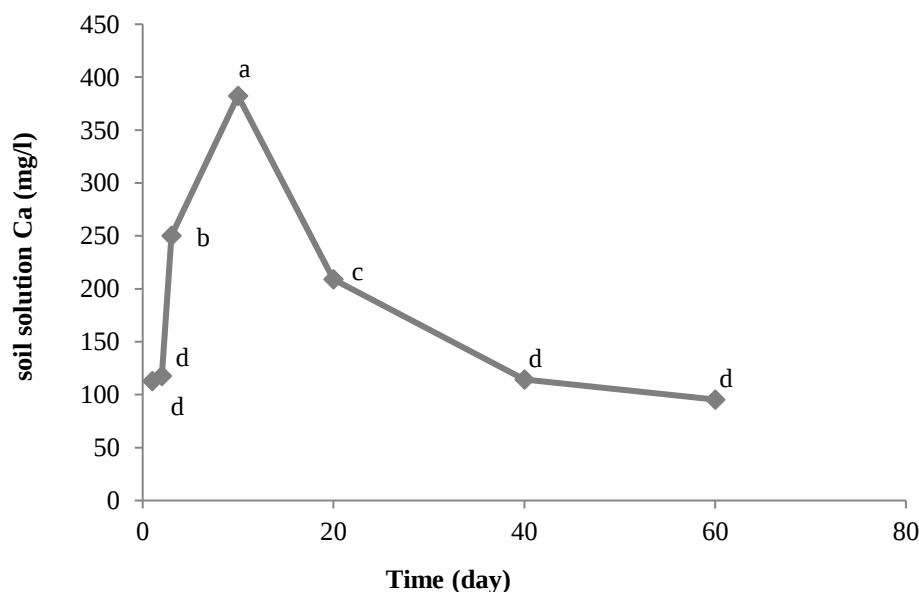
تأثیر کلسیم در راندمان آب مصرفی، تنها محدود به تنظیم فعالیت استومات‌ها نیست بلکه کلسیم همچنین برای توسعه ریشه‌های سالم ضروری است. رشد ریشه در شرایط کمبود کلسیم به شدت کاهش می‌یابد و در شرایط کمبود شدید کلسیم رشد ریشه متوقف می‌شود که منجر به ایجاد سیستم ریشه‌ای ضعیف می‌شود. ریشه‌های ضعیف و کم عمق نمی‌توانند به طور مؤثر آب را از خاک جذب کنند که منجر به تلفات زیاد آب به شکل زهکشی و کاهش راندمان آب مصرفی می‌شوند. علاوه بر جذب آب، ریشه‌ها مسئول جذب عناصر غذایی هم هستند فراهمی کلسیم جذب عناصر کم مصرف به ویژه منگنز را افزایش می‌دهد جذب عناصر غذایی تحت تأثیر حجم توده ریشه و فعالیت ریشه است و هر دوی این‌ها تحت تأثیر فراهمی کلسیم می‌باشند. کلسیم قدرت رویشی ریشه را تحریک می‌کند که به نوبه خود سطح ویژه بیشتری را برای جذب عناصر غذایی ایجاد می‌کند.

کلسیم و تنش مانداب

توسعه خسارت ناشی از کمبود کلسیم بیشتر در خاک‌های با تنش مانداب و رطوبت بالا رخ می‌دهد. همچنین دوره‌های بی‌هوازی جزئی خاک در شرایط آب و

هوایی مرطوب می‌تواند موجب کاهش موقتی انتقال کلسیم به سرشاخه‌ها شود. بنابراین مدیریت رطوبت بهینه خاک (نه خیلی مرطوب و نه خیلی خشک) در حرکت کلسیم کافی از محلول خاک به سطح ریشه و سپس به اندام هوایی کمک می‌کند. مدیریت بهینه آبیاری و اجتناب از تنش خشکی و تنش ماندابی در منطقه ریشه درختان مرکبات، به‌ویژه در مرحله اول رشد میوه در افزایش کلسیم میوه‌ها بسیار مؤثر است. تنش مانداب به‌ویژه در اوایل فصل رشد (فاز اول رشد میوه)، جذب کلسیم توسط ریشه و انتقال آن به اندام هوایی را به شدت کاهش می‌دهد. این تنش مانداب می‌تواند ناشی از بارندگی‌های زیاد و متوالی و همچنین آبیاری زیاد و نامناسب باشد که موجب کاهش تهویه خاک منطقه ریشه می‌شود. میانگین غلظت کلسیم در محلول خاک آهکی (هفت خاک با آهک کل از ۲ تا ۴۵ درصد) در حدود ۱۱۳ میلی‌گرم در لیتر بود و تنش مانداب موجب افزایش میانگین غلظت کلسیم در محلول این خاک‌ها شد (Asadi Kangarshahi, 2021). تغییرات زمانی غلظت کلسیم محلول خاک‌های مختلف در شرایط ماندابی نشان داد که غلظت کلسیم در این خاک‌ها پس از ۱۰ روز به حداکثر رسید سپس کاهش یافت و روند تغییرات تقریباً یکسان بود (شکل ۱۳). دیگر پژوهشگران نیز نشان دادند که

غلظت کلسیم در محلول خاک تحت شرایط مانداب و غرقاب افزایش می‌یابد (Larson et al., 1991; Narteh and Sahrawat, 1999). افزایش غلظت کلسیم در محلول خاک ناشی از حل شدن کربنات‌ها و بی‌کربنات‌های نامحلول خاک در خاک‌های آهکی تحت شرایط ماندابی، حلالیت فسفات‌های کلسیم، کاهش سایت‌های تبادلی به دلیل حلالیت کربن آلی (تخریب ساختمان خاک و خاکدانه‌ها با ماندابی شدن موجب حل شدن برخی عوامل سیمانی از جمله مواد آلی با وزن سبک به محلول خاک می‌شود که می‌توانند به‌صورت پوششی در روی برخی محل‌های تبادلی قرار گیرند) و اکسیدهای هیدروکسی آهن و منگنز و همچنین جایگزینی کلسیم در سایت‌های تبادلی خاک با سدیم، آهن و منگنز است که به دلیل افزایش قدرت یونی محلول و همچنین افزایش غلظت آهن، منگنز و سدیم در محلول خاک است (لارسون و همکاران، ۱۹۹۱). بنابراین میانگین غلظت کلسیم در محلول خاک‌های تحت شرایط مانداب ابتدا افزایش یافت و حدوداً پس از ۱۰ روز به حداکثر رسید، سپس دوباره با شیب کمتری کاهش یافت و به مقدار اولیه در شروع تنش مانداب و غرقاب رسید، غلظت کلسیم حدود ۱۰ روز پس از مانداب به حداکثر رسید (شکل ۷).

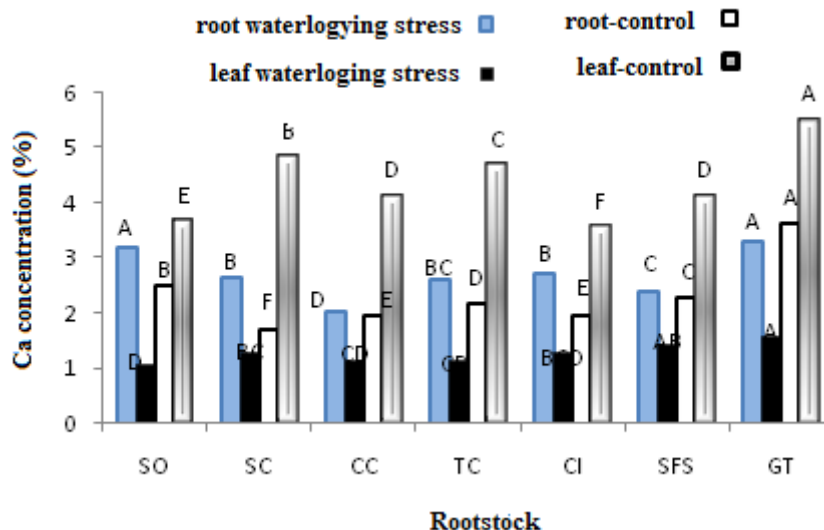


شکل ۷- روند تغییرات غلظت کلسیم در محلول خاک‌های آهکی تحت شرایط مانداب

Figure 7- The trend of Ca concentration changes in soil solution under waterlogging conditions in calcareous soils

همچنین غلظت کلسیم در برگ درختان مرکبات نیز به شدت تحت تأثیر شرایط تنش مانداب قرار می‌گیرد و مقدار کلسیم در برگ بسیار بیشتر از کلسیم ریشه تحت تأثیر شرایط تنش قرار می‌گیرد. نتایج بررسی‌های میدانی نشان داده است که میانگین غلظت کلسیم در برگ درختان مرکبات بدون تنش مانداب از $3/5$ تا $5/3$ درصد و درختان در معرض تنش مانداب از $1/26$ تا $3/8$ درصد است (Asadi Kangarshahi, 2021). از آنجایی که کلسیم به صورت غیرفعال توسط منطقه نوک ریشه‌های در حال رشد جذب می‌شود، بنابراین پایه‌هایی که رشد ریشه‌های آن‌ها، بیشتر تحت تأثیر تنش مانداب قرار می‌گیرد جذب کلسیم آن‌ها نیز بیشتر تحت تأثیر قرار خواهد گرفت. کلسیم به چندین شکل از جمله یونی در خاک وجود دارد که روی سطح ذرات خاک یا در محلول خاک وجود دارد. معمولاً بیش از ۸۰ درصد مکان‌های تبادل‌ی خاک را یون کلسیم اشغال می‌کند که با یون‌های موجود در محلول خاک در تعادل هستند. کلسیم تبدلی، در پایداری ساختمان خاک نقش اساسی دارد و سبب افزایش تجمع ذرات خاک به شکل خاکدانه می‌شود. با مانداب و غرقاب شدن خاک، مقدار زیادی از کلسیم تبدلی وارد محلول خاک شده و تخریب خاکدانه‌ها تسریع می‌شود. از طرفی، کلسیم به شکل غیرفعال توسط ریشه‌های در حال رشد جذب می‌شود بنابراین نیاز به مصرف انرژی ندارد. اما در مقابل، فقط نواحی انتهایی اطراف نوک ریشه‌های در حال رشد قادر به جذب کلسیم (بر خلاف فسفر و پتاسیم) می‌باشند. بنابراین

هر عاملی که رشد ریشه را محدود کند (مانند تنش مانداب و غرقاب) جذب کلسیم را نیز کاهش می‌دهند. کلسیم همچنین به شکل خاصی در آوندهای چوبی حرکت می‌کند و غلظت آن در آوندهای آبکشی نیز بسیار کم است، بنابراین به آسانی نمی‌تواند از برگ‌ها خارج و به سایر اندام‌ها انتقال یابد. کلسیم در بسیاری از فرآیندهای گیاه مانند تقسیم سلولی، طویل شدن سلول‌ها، ثبات نفوذپذیری غشای سلولی و استحکام سلولی نقش دارد و کمبود آن موجب می‌شود غشای سلول‌ها تراوا و نشت‌پذیر شود و کنترل ورود و خروج سلول‌ها کاهش یابد. نظر به این که کلسیم به صورت جریان توده‌ای به سطح ریشه‌ها حرکت می‌کند و به شکل غیرفعال جذب و توسط آوندهای چوبی به اندام هوایی انتقال می‌یابد و از طرفی تنش مانداب، میانگین هدایت هیدرولیکی ریشه را به شدت کاهش می‌دهد، بنابراین با کاهش هدایت هیدرولیکی ریشه‌ها، جریان توده‌ای آب به سطح ریشه و به واسطه آن حرکت کلسیم به سطح ریشه و همچنین انتقال آن در آوندهای چوبی از ریشه به اندام هوایی کاهش می‌یابد که موجب کاهش شدید غلظت کلسیم در برگ‌ها می‌شود. نتایج پژوهش‌های میدانی نشان داده است که درختان مرکبات با پایه ترویرسیترنج و سی-۳۵ به ترتیب بیشترین و کمترین تغییرات غلظت کلسیم در برگ در پاسخ به تنش مانداب دارند و به طور کلی میانگین تغییرات غلظت کلسیم در ریشه کمتر از تغییرات غلظت کلسیم در برگ در شرایط تنش مانداب است (شکل ۸).



شکل ۸- تأثیر مانداب طولانی مدت بر تغییرات غلظت کلسیم در برگ و ریشه درختان مرکبات با پایه‌های مختلف
 Figure 8- The effect of long-term waterlogging stress on changes in Ca concentration in leaves and roots of citrus trees with different rootstocks

(SO: نارنج؛ SC: سوینگل سیتروملو؛ CC: کاریزوسیترنج؛ TC: ترویرسیترنج؛ CI: سی ۳۵؛ SFS: اسموت فلت سویل؛ GT: گوتو)

سدیم در مکان‌های تبادلی می‌شود و این کاتیون‌های رها شده با یون سولفات در محلول خاک ترکیب و ترکیبات محلول این کاتیون‌ها حاصل خواهد شد که به آسانی قابل شستشو و انتقال به لایه‌های پایینی پوفیل خاک هستند بنابراین تأثیری در pH خاک نخواهد داشت. لذا گچ بیشتر به عنوان یک منبع کلسیم استفاده می‌شود زیرا بسیار محلول-تر از آهک به‌ویژه در خاک‌های قلیایی است (اما در کل حلالیت گچ نیز پایین است). گچ همچنین می‌تواند به عنوان منبع سولفور در خاک‌های با کمبود سولفور مصرف شود.

کلسیم و تنش سرما و یخبندان

کمبود کلسیم، حساسیت درختان را به تنش سرما و یخبندان افزایش می‌دهد. معمولاً ژنوتیپ‌هایی که تحمل بیشتری به تنش سرما دارند، قادر به نگهداری و ثبات بیشتر پتانسیل آب برگ‌هایشان با بستن روزنه‌ها و جلوگیری از تلفات آب هستند. کلسیم، یک عنصر ضروری برای بسته شدن روزنه‌ها در هنگام وقوع تنش سرما و یخبندان در ژنوتیپ‌های متحمل به این تنش است. کلسیم بیشتر، بسته شدن سریع‌تر روزنه‌ها را امکان‌پذیر می‌کند و این اثر، در درختانی که در معرض تنش‌های سرما و یخبندان قرار می‌

کلسیم و تنش شوری

غلظت بالای نمک‌ها در محلول خاک موجب تشدید کمبود کلسیم در درختان مرکبات می‌شود. محدود شدن جذب آب در شوری‌های زیاد منطقه ریشه می‌تواند یکی از دلایل کمبود کلسیم باشد و با کاهش جذب آب، جذب و انتقال کلسیم نیز کاهش می‌یابد. همچنین غلظت بالای سدیم و کلر در محلول خاک به ترتیب در جذب و انتقال کلسیم به اندام هوایی درختان تأثیر دارند و موجب تشدید ناهنجاری‌های ناشی از کمبود کلسیم می‌شوند به‌طور کلی درختان مرکبات در خاک‌های شور، کمبود پتاسیم و کلسیم دارند و مصرف کودهای نیترات کلسیم و نیترات پتاسیم موجب افزایش جذب کلسیم و پتاسیم، کاهش جذب کلر، بهبود غلظت نیتروژن برگ و افزایش عملکرد خواهد شد. همچنین گچ نیز می‌تواند به عنوان یک منبع کلسیم و سولفور و یک بهبوددهنده خاک به‌طور گسترده استفاده شود و بیشتر برای بهبود خاک‌های تحت تأثیر نمک (مانند خاک‌های شور و سدیک) استفاده می‌شود. ترکیب شیمیایی گچ، سولفات کلسیم است که در محلول خاک به یون کلسیم و سولفات شکسته می‌شود. یون کلسیم جانشین برخی کاتیون‌ها از جمله یون‌های هیدروژن و

گیرند بسیار مشخص است. همچنین بسته شدن روزنه‌ها ناشی از اسید آسبیزیک تا حدودی به وسیله کلسیم رها شده از ذخایر سلول‌های نگهبان روزنه یا آپوپلاست، واسطه می شود و این عمل سبب شده است که از کلسیم به عنوان یکی از مهم‌ترین عناصر در تحمل درختان به سرمازدگی و محافظت برگ‌ها از دهیدراسیون نام برده شود. به طور کلی در هنگام رخداد تنش سرما و یخبندان، کلسیم درون سیتوپلاسم سلول افزایش می‌یابد و این افزایش، از کلسیم فضای بیرون سلولی تأمین می‌شود. به طور کلی کلسیم از طریق پروتئین‌های تنظیم‌کننده کلسیم یا پروتئین‌های دارای اثر متقابل با کلسیم عمل می‌کند. بیشتر پژوهش‌ها نشان داده‌اند که کالمدولین‌ها در القاء ژن‌های متحمل به تنش سرما مؤثر هستند. در صورتی که درختان کمبود کلسیم داشته باشند القاء ژن‌ها برای سازگاری به سرما و یخبندان انجام نخواهد شد. مطالعات میدانی نگارندگان نشان داده است که درختان مرکبات دارای کمبود کلسیم نسبت به درختان دارای کلسیم مطلوب حساس‌تر به تنش سرما و یخبندان هستند.

کلسیم و حساسیت به بیماری‌ها

به طور کلی اهمیت کلسیم در مکانیسم دفاعی سلول‌ها عمدتاً ناشی از نقش عمومی تغذیه‌ای و فیزیولوژیکی کلسیم است. کلسیم با بهبود قدرت مکانیکی سلول، استحکام غشای سلولی و همچنین استحکام دیواره سلولی به طور مستقیم در مقاومت برگ‌ها، میوه‌ها، ریشه‌ها و دیگر بافت‌های گیاهی در مقاومت و کاهش نفوذ پاتوژن به این بافت‌ها مؤثر است. بخش زیادی از کلسیم (برخلاف دیگر عناصر غذایی پرمصرف) در دیواره سلولی بافت‌های گیاهی قرار دارد که به علت وجود جایگاه‌های زیاد برای قرار گرفتن آن در دیواره‌های سلولی و همچنین انتقال بسیار کم کلسیم از غشای سیتوپلاسم و ورود آن به سیتوپلاسم سلول است. در تیغه میانی دیواره سلولی، کلسیم به شدت

به گروه‌های کربوکسیل اسید گالاکتورونیک (پکتین‌ها) می‌چسبد و تقریباً غیرقابل تبادل می‌شود. در بیشتر دولپه‌ای‌ها از جمله مرکبات، تقریباً ۵۰ درصد از کلسیم به شکل پکتات‌های کلسیم است. تجزیه پکتات‌ها، توسط آنزیم پلی گالاکتوروناز انجام می‌شود و غلظت بالای کلسیم در بافت‌ها به شدت از فعالیت این آنزیم جلوگیری می‌کند. در مقابل، در بافت‌های دارای کمبود کلسیم، فعالیت این آنزیم افزایش می‌یابد. بنابراین مقدار پکتات کلسیم در دیواره‌های سلولی گیاهان و میوه‌ها، در حساسیت این بافت‌ها به آلودگی‌های قارچی بسیار مؤثر است (Rudd et al., 1999; Rahman and Punja, 2002). به طوری که هر چه مقدار کلسیم بیشتر باشد حساسیت بافت‌ها به آلودگی‌های قارچی کاهش می‌یابد کلسیم مقاومت بافت‌ها را در مقابل آلودگی قارچ-های پیتیوم^۵، اسکروتینا^۶، بوتیریس^۷، فوزاریوم^۸ و ... را افزایش می‌دهد همچنین فراهمی کلسیم به طور قوی در کاهش تلقیح قارچ‌های زنگ^۹ مؤثر است که نشان می‌دهد تغذیه بهینه کلسیم در سلامت درختان مؤثر است. بیماری HLB^{۱۰} که به بیماری گرینینگ مرکبات معروف است در بسیاری از مناطق مرکبات کاری جهان از جمله مناطق جنوبی کشور وجود دارد این بیماری توسط باکتری-های محدود یا مسدودکننده آوند آبکشی ایجاد می‌شود که توسط حشراتی به نام پسیل مرکبات منتقل می‌شود این حشرات ترجیحاً از برگ‌های نرم تغذیه می‌کنند. علائم گرینینگ در درختان آلوده شامل کلروز یا لکه‌های زرد برگ‌ها، سرشاخه‌های زرد، چوب‌پنبه‌ای شدن رگبرگ‌ها، توقف رشد، توقف رشد جدید ریشه و عملکرد پایین و همچنین میوه‌های کوچک‌تر، سبز، بدشکل با بذره‌های سقط شده است. برخی از این علائم مشابه علائم کمبود کلسیم است به طور کلی بیشتر مطالعات نشان داده است که غلظت کلسیم در برگ‌های گیاهان آلوده به HLB پایین‌تر از گیاهان سالم است. با توجه به تأثیر تغذیه کلسیم در پایداری دیواره سلولی، تغذیه کلسیم موجب تشکیل برگ‌های با استحکام

8 - Fusarium

9 - Rust fungus

10 - Huanglongbing

5 - Pythium

6 - Sclerotinia

7 - Botrytis

بیشتر می‌شود که مقاومت آن‌ها را در مقابل هجوم و حمله پسیل افزایش می‌دهد. علاوه بر این، کلسیم ممکن است اثرات منفی HLB در رشد ریشه درختان آلوده را خنثی کند در کل شواهدی وجود دارد که تغذیه بهینه می‌تواند علائم HLB را کاهش دهد و بهره‌وری و عمر اقتصادی درختان را افزایش دهد و به نظر می‌رسد مدیریت تغذیه کلسیم در افزایش بهره‌وری و افزایش عمر اقتصادی درختان مؤثر است (Grierson, 1981; Gottwald et al., 2007).

کلسیم، درجه حرارت و رطوبت نسبی محیط

کلسیم با جریان تعرق به اندام هوایی (میوه و برگ‌ها) حرکت می‌کند بنابراین کاهش تعرق در شرایط محیطی با رطوبت نسبی زیاد می‌تواند جذب کلسیم را محدود کند دلایل کاهش انتقال کلسیم در شرایط محیطی با رطوبت نسبی زیاد این است که اولاً در شرایط رطوبت نسبی زیاد، سرعت رشد افزایش می‌یابد که می‌تواند تقاضای بافت‌های مرستمی را برای کلسیم افزایش دهد و بر اساس اصل رقت، غلظت کلسیم در بافت‌های در حال توسعه می‌تواند به زیر حد بحرانی خسارت برسد. دلیل دوم اینکه رطوبت نسبی زیاد، میزان تعرق در میوه‌ها و برگ‌ها را کم می‌کند که موجب کاهش جذب آب و انتقال آن به این اندام‌ها می‌شود و در نتیجه غلظت کلسیم در سرشاخه‌ها و میوه‌ها کاهش می‌یابد. رخداد درجه حرارت‌های بسیار پایین و بالا، جذب کلسیم را کاهش می‌دهند و در نتیجه کمبود کلسیم را تشدید می‌کنند. اختلاف منفی بین درجه حرارت روز و شب (درجه حرارت شب بیشتر از روز) می‌تواند بروز ناهنجاری‌های ناشی از کمبود کلسیم را تشدید کند. شدت نور بالا، به مقداری که رشد میوه‌ها را تشدید کند می‌تواند کمبود کلسیم را تشدید کند به‌طور کلی شرایط محیطی مناسب برای تعرق بالا در برگ‌های بالغ، افزایش تلفات آب و همچنین تنش آبی موجب کاهش جریان شیره خام به درون میوه‌ها و جذب کلسیم توسط میوه‌ها خواهد شد و در نتیجه حساسیت میوه‌ها را به ناهنجاری کمبود کلسیم افزایش می‌دهد (Tadesse et al., 2001; Taylor and Locascio, 2004).

بیشتر مطالعات نشان داده است که افزایش تعرق در میوه‌ها بدون تغییر در تعرق کل گیاه، در افزایش میزان کلسیم این اندام‌ها بیشتر از افزایش قابلیت استفاده کلسیم خاک مؤثر است. علاوه بر این، کاهش در تعرق کل گیاه یا توسط کاهش کمبود فشار بخار آب یا محلول‌پاشی گیاهان با اسید آسزیک می‌تواند حرکت شیره آوند چوبی (شیره خام) به طرف برگ‌های بالغ را کاهش داده و در مقابل حرکت آن را به طرف میوه‌ها (با تعرق کم) افزایش دهد که می‌تواند موجب افزایش تجمع کلسیم و کاهش حساسیت آن‌ها به ناهنجاری‌های ناشی از کمبود کلسیم شود. تنش آبی نیز موجب تشدید توسعه ناهنجاری‌های کمبود کلسیم در میوه‌ها و برگ‌های جوان با تعرق کم شود. تنش آبی که توسط کمبود آب یا شوری بالا ایجاد می‌شود موجب کاهش شیب پتانسیل آبی بین میوه و برگ‌های جوان با تعرق کم می‌شود در نتیجه جذب کلسیم را کاهش و حساسیت این بافت‌ها را به ناهنجاری‌های کمبود کلسیم افزایش می‌دهد. همچنین با توجه به این‌که کلسیم تجمع یافته در برگ‌های مسن قابلیت جابجایی یا توزیع مجدد و انتقال به بافت‌های دارای کمبود کلسیم و با تعرق کم را ندارد (به عبارتی در آوندهای آبکشی غیرمتحرک است)، تنش آبی این ناهنجاری را تشدید می‌کند. اگرچه تعرق و رشد از عوامل مهم تعیین‌کننده جریان شیره خام و جذب کلسیم هستند تعداد آوندهای چوبی و شیب هیدروستاتیک (پایدار آبی) مورد نیاز برای حرکت شیره خام نیز می‌تواند در مقدار کلسیم میوه‌ها مؤثر باشد. مطالعات نشان داد است که تعداد آوندهای چوبی کارا (فعال) و تجمع کلسیم در میوه‌ها هم‌زمان با رشد و توسعه میوه کاهش می‌یابد. بنابراین در کل، تعداد آوندهای چوبی فعال و شیب هیدروستاتیک در این آوندها در افزایش تجمع کلسیم میوه و حساسیت آن‌ها به ناهنجاری‌های کمبود کلسیم بسیار مؤثر است (White, 2001; Asadi Kangarshahi, 2021).

کلسیم، بافت و تراکم خاک

به‌طور کلی درختان مرکباتی که در بافت‌های بسیار سبک (شنی و شن لومی) کشت می‌شوند یا دارای

مقدار زیادی شن در منطقه ریشه هستند به علت ظرفیت نگهداری پایین به مدیریت آبیاری فشرده تری نیاز دارند حجم زیاد آب مصرفی در هر آبیاری (در یک زمان) می تواند موجب آبشویی شدید عناصر غذایی از جمله کلسیم شود. در مقابل، خاک های بافت ریز (رسی، رس شنی و رس سیلتی) نیز اغلب مشکل ساختمانی و زهکشی دارند که موجب کاهش توسعه ریشه، تشدید کمبود کلسیم، تشدید خشکیدگی سرشاخه ها و زوال مرکبات می شوند. به طور کلی کلاس های متوسط و نسبتاً درشت (لوم شنی، لوم، لوم سیلتی و سیلتی) مناسب ترین کلاس های بافت خاک برای کاشت درختان مرکبات هستند. بافت های لوم رسی سیلتی، لوم رسی، لوم رسی شنی نسبتاً سنگین هستند و مدیریت مناسب کاشت و داشت از جمله انتخاب پایه مناسب، ایجاد بستر مناسب در زمان احداث باغ و همچنین مدیریت کوددهی در طی فصل رشد متناسب با فنولوژی درختان در این خاک ها در افزایش عملکرد و کیفیت میوه آن ها بسیار مؤثر است. نتایج پژوهشی نگارندگان نشان داده است که در بیشتر باغ ها، با افزایش وزن مخصوص ظاهری در خاک تحتانی، عملکرد در واحد سطح کاهش می یابد. رشد ریشه های ریز معمولاً در لایه های با ۵۰ درصد یا بیشتر سنگریزه یا لایه های با فشردگی زیاد، محدود می شود. جرم مخصوص ظاهری، یکی از پارامترهای فیزیکی خاک است که کمترین ضریب تغییرات را در مقایسه با دیگر خصوصیات فیزیکی دارد. معمولاً عمقی از خاک، که در آن لایه یا لایه های با جرم مخصوص ظاهری بیشتر از حد بحرانی وجود داشته باشد، پتانسیل باروری خاک را تعیین می کند. حد بهینه و بحرانی جرم مخصوص ظاهری برای خاک های رسوبی، به ترتیب حدود ۱/۳-۱/۲ و ۱/۶۰-۱/۵ گرم بر سانتی متر مکعب است. برای رسیدن به عملکرد بالا در خاک های با بافت ریز و متوسط، جرم مخصوص ظاهری ۱/۱-۱/۳ گرم بر سانتی متر مکعب با ۴۰-۵۰ درصد ذرات جامد درشت و با عمق حداقل ۸۰-۷۰ سانتی متر، نیاز است. خاک های با عمق حداقل ۲ متر، بافت یکنواخت و زهکشی خوب در لایه های تحتانی، عمق آب زیرزمینی پایین تر از

۱۵۰ سانتی متر در تمام طول سال، مناسب ترین خاک ها برای کشت مرکبات هستند. بیشترین ریشه های مرکبات در عمق ۷۰ - ۴۰ سانتی متری تجمع می یابند. پژوهش های انجام شده در خاک های عمیق سنگریزه دار نشان داده است که در خاک های با بیشتر از ۱۵ درصد سنگریزه، عملکرد مرکبات کمتر از ۵۰ درصد خاک های بدون سنگریزه با عمق یکسان است. کاهش pH محلول خاک به کمتر از ۴/۵، قابلیت استفاده و در نتیجه جذب کلسیم توسط ریشه ها را به مقدار زیادی کاهش می دهد. اما در pH های بیشتر از ۵/۵ (به علت افزایش غلظت یون کلسیم در محلول خاک نسبت به هیدروژن) تأثیر pH در جذب کلسیم کاهش می یابد. پتانسیل آهک که رابطه بین یون هیدروژن و غلظت کلسیم را بیان می کند در محاسبه اثر pH در حلالیت ترکیبات کلسیم خاک مانند فسفات های کلسیم بسیار مفید است.

کلسیم، هرس و تراکم تاج

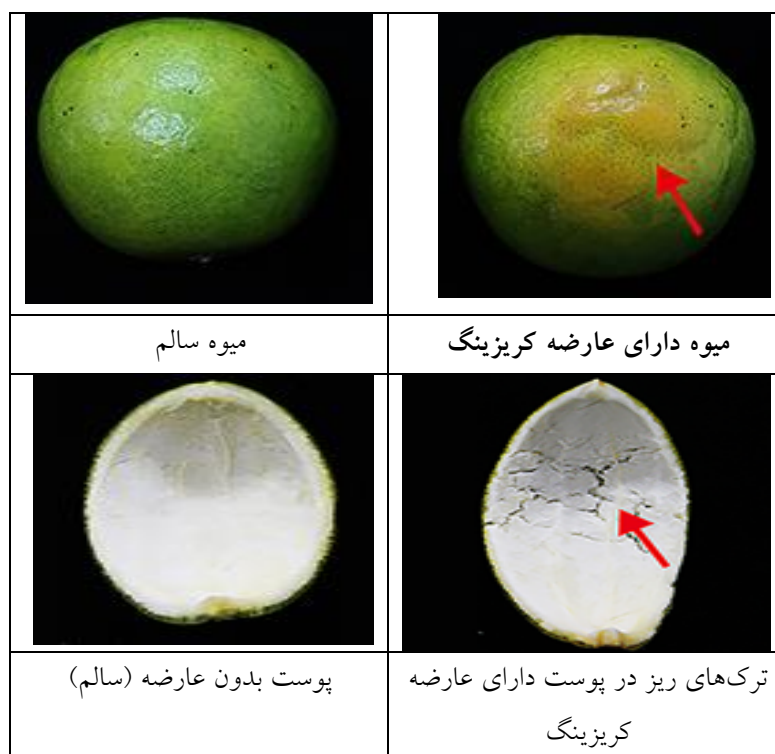
هرس شدید زمستانه موجب تشدید رشد رویشی سرشاخه ها و افزایش غیرمعمول اندازه میوه ها می شود که یکی از دلایل اصلی کمبود کلسیم و پفی شدن میوه ها در برخی از ارقام مرکبات است. به طور کلی هرس مناسب فرم دهی و همچنین مدیریت مناسب هرس درختان بارده موجب بهبود تهویه، کاهش رطوبت نسبی درون تاج درختان و همچنین نفوذ نور بیشتر به داخل تاج درختان می شود که موجب افزایش تعرق میوه چه ها به ویژه در مرحله اول رشد میوه می شود که در جذب و انتقال کلسیم به میوه چه ها و میوه های جوان بسیار مؤثر است. در مقابل در صورت عدم انجام یا مدیریت نامناسب هرس فرم دهی و هرس درختان بارده (به ویژه در ژنوتیپ های پررشد) و همچنین زیادی مصرف کودهای شیمیایی به ویژه کودهای نیتروژنی موجب افزایش تراکم تاج درختان، کاهش تهویه و کاهش تعرق میوه های داخل تاج شده که منجر به کاهش کلسیم میوه های درون تاج می شود که کیفیت و انبارمانی آن ها را به شدت تحت تأثیر قرار می دهد. لذا مدیریت تغذیه درختان پس از هرس در درختان میوه از اهمیت بسیار

زیادی برخوردار است. علاوه بر تعداد بیشتر آوندهای چوبی کارا و فعال، یک شیب هیدروستاتیک مناسب برای حرکت شیره خام و کلسیم به میوه مورد نیاز است. برای افزایش و ایجاد شیب هیدروستاتیک مناسب، معمولاً روش‌های که تعرق میوه‌ها را افزایش دهند مانند کاهش واکس سطح میوه، هرس بهینه سرشاخه‌ها و کاهش تراکم تاج درختان توصیه می‌شود.

کلسیم، کریزینگ (شکستگی بافت آلبیدو) (پوست داخلی) و پفی شدن میوه

ناهنجاری‌های کمبود کلسیم زمانی روی می‌دهد که کلسیم کافی برای توسعه بافت‌های در حال توسعه در دسترس نباشد. از این رو، کمبود کلسیم به‌طور عمده در بافت‌هایی ایجاد می‌شود که در آن‌ها تقسیم سلولی در حال انجام است و سلول‌های جدید در حال تولید هستند (Hopkins and Huner, 2004; Storey and Treeby, 2002). نتایج میدانی غلظت کلسیم در بافت پوست میوه درختان مرکبات بدون عارضه و دارای عارضه کریزینگ نشان داد که میانگین غلظت کلسیم در بافت پوست میوه‌های درختان دارای عارضه حدود ۷ تا ۸ میلی‌گرم در گرم وزن خشک بافت آلبیدو بود که به‌طور قابل‌توجهی کمتر از غلظت کلسیم در بافت آلبیدو میوه‌های درختان بدون عارضه کریزینگ (حدود ۱۲ تا ۱۴ میلی‌گرم در گرم وزن خشک بافت آلبیدو) بود اما تفاوت معنی‌داری در میانگین غلظت کلسیم برگ درختان دو منطقه وجود نداشت. علاوه بر کلسیم، غلظت منیزیم نیز در بافت پوست میوه‌های دارای عارضه کمتر از میوه‌ها سالم و بدون عارضه بود، اما نسبت‌های پتاسیم به کلسیم^{۱۱} و منیزیم به کلسیم^{۱۲} تفاوت معنی‌داری با هم نداشتند. نتایج میدانی نشان داد که در بافت

پوست میوه‌های دارای عارضه، غلظت کلسیم، منیزیم و پتاسیم کمتر از میوه‌های بدون عارضه بود اما نسبت پتاسیم به کلسیم و منیزیم به کلسیم در آن‌ها بیشتر از میوه‌های بدون عارضه بود (شکل ۹). در مورد عارضه پفی شدن میوه‌ها، تجزیه سلول‌های بافت پوست داخلی (آلبدو) می‌تواند عامل انبساط میوه پس از بارندگی و پفی شدن میوه‌ها باشد به‌طوری‌که در طی این فرآیند ساختمان آلبدو اسفنجی شده و فضای بین سلولی آن‌ها بزرگ می‌شود (Asadi, 2023; Jaime et al., 2024). گزارش‌های دیگر کاهش سفتی پوست میوه مرکبات و پفی شدن را به فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده دیواره سلولی نسبت داده‌اند به‌طورکلی، در میوه مرکبات فعالیت برخی آنزیم‌ها در طی رسیدن افزایش می‌یابد. این آنزیم‌ها می‌توانند تغییرات ساختاری در اپیدرم تحتانی سلول‌های بافت آلبدو ایجاد کرده و انبساط و پفی شدن را موجب شوند (Bramlage, 1994; Hirschi, 2004). مجلول‌پاشی کلسیم، پفی شدن پوست میوه را کاهش می‌دهد کلسیم پس از نفوذ به اپیدرم سلول‌های پوست به‌سرعت توسط اپیدرم تحتانی جذب‌شده و موجب کاهش یا مانع فعالیت آنزیم‌هایی می‌شود که منجر به پفی شدن میوه می‌شوند (Asadi, 2023). کلسیم متصل به پکتات در لایه میانی برای استحکام و سفتی دیواره سلولی (ناشی از پیوندهای متقابل زنجیره‌های پکتیک لاملای میانی). همچنین ویژگی‌های ژلاتینی پکتیک ضروری است و در بافت‌های با کمبود کلسیم، فعالیت پلی‌گالاکتوروناز افزایش می‌یابد و افزایش پلی‌گالاکتوروناز موجب تجزیه دیواره‌های سلولی و تخریب بافت‌های تحت تأثیر می‌شود (شکل ۱۰).



شکل ۹- کرزینگ در میوه پرتقال والنسیا
Figure 9- Creasing in fruit of Valencia orange



شکل ۱۰- میوه پفی شدن میوه نارنگی انشو
Figure 10- Puffing in satuma mandarin fruit

کلسیم و انبارمانی میوه

کمبود کلسیم موجب کاهش زمان ماندگاری میوه در روی درختان و همچنین زمان انبارمانی میوه‌ها می‌شود که ناشی از افزایش میزان تنفس سلول‌ها و همچنین افزایش احتمال آلودگی‌های قارچی است. افزایش تنفس سلول‌ها به علت تجمع قندهای محلول و تجمع ترکیبات نیتروژنی

محلول با وزن مولکولی کم در سلول‌ها است که سوبستراهای مناسبی برای آنزیم‌های تنفسی هستند. عمده کلسیم بافت‌های گیاهی در دیواره سلولی قرار دارد که پایداری ساختمانی سلول را ایجاد می‌کند. در مقابل، کمبود کلسیم سبب تجزیه دیواره سلولی و فروپاشی بافت میوه‌ها می‌شود. از این رو، در کمبود کلسیم و فراهمی پایین کلسیم،

درصد زیادی از میوه‌های مرکبات ریزش خواهند کرد. کلسیم همچنین نقش معنی‌داری در مقاومت به بیماری‌های گیاهی (دفاع خود گیاه) دارد. پاتوژن‌های گیاهی ابتدا موجب تخریب دیواره سلولی، قبل از ورود به سلول می‌شوند. تخریب دیواره سلولی توسط آنزیم پلی‌گالاکتوروناز انجام می‌شود پلی‌گالاکتوروناز آنزیمی است که توسط پاتوژن‌ها تولید می‌شود که موجب هضم پکتین دیواره سلولی می‌شود. کلسیم قویاً مانع فعالیت این آنزیم می‌شود و موجب افزایش مقاومت به بیماری‌های گیاهی می‌شود. سفتی بافت میوه یکی از شاخص‌های حیاتی کیفیت میوه پس از برداشت است و اغلب با میزان کلسیم میوه ارتباط مثبتی دارند (شکل ۱۱). مصرف کودهای کلسیم در زمان مناسب باعث افزایش محتوای کلسیم میوه‌ها در هنگام برداشت می‌شود که موجب افزایش سفتی میوه می‌شود که نشان‌دهنده بهبود عملکرد ذخیره‌سازی نیز است. به‌طورکلی کلسیم در حفظ یا تقویت یکپارچگی غشای سلولی و دیواره سلولی، مهار تخریب اجزای دیواره سلولی، کاهش

تنفس میوه، سنتز اتیلن، تنظیم فعالیت‌های آنزیمی و متابولیسم مرتبط با پیری نقش دارد. علاوه بر این، کلسیم کاهش هدایت هیدرولیکی میوه را تسهیل می‌کند و کاهش وزن میوه‌ها را در زمان انبارمانی را به حداقل می‌رساند و قهوه‌ای شدن آنزیمی پوست میوه، نرم شدن میوه‌ها و توسعه بیماری را به تأخیر می‌اندازد. همچنین کلسیم به‌طور مؤثری باعث افزایش روشنایی پوست، شاخص‌های اشباع رنگ و کیفیت رنگ پوست در طول ذخیره‌سازی می‌شود. به‌طورکلی درصد پوسیدگی و کاهش وزن میوه از مهم‌ترین شاخص‌های مهم کیفیت ذخیره‌سازی میوه‌های مرکبات هستند. مصرف بهینه کلسیم محتوای اسید پکتیک آزاد را کاهش و محتوای پکتین کلسیم میوه‌ها را افزایش داده و تغییرات در نفوذپذیری غشای میوه را کاهش و مقاومت آن‌ها را در برابر پوسیدگی و ذخیره‌سازی افزایش می‌دهد که در نهایت باعث طولانی شدن زمان امکان ذخیره‌سازی و ماندگاری میوه‌ها و افزایش کیفیت میوه در طول دوره انبارمانی می‌شود.



شکل ۱۱- تأثیر کمبود کلسیم بر شل شدن بافت پوست میوه نارنگی انشو

Figure 11- The effect of Ca deficiency on the peel tissue softening of Satsuma mandarin fruit

برخی از مهم‌ترین راهکارهای عملی برای افزایش کلسیم میوه (اسدی کنگرشاهی، ۱۴۰۰):

۱. مصرف بهینه کودهای شیمیایی متناسب با پیش بینی عملکرد میوه و نیاز مراحل فنولوژی و فیزیولوژی رشد میوه می‌تواند رقابت با جذب کلسیم را کاهش دهد و یا رشد رویشی زیاد درختان را مانع شود (به‌ویژه اجتناب از

مصرف زیاد کودهای سولفات آمونیوم و سولفات پتاسیم و سولفات منیزیم در مرحله اول رشد میوه). رشد رویشی زیاد موجب حرکت بیشتر کلسیم به سمت برگ‌ها می‌شود و در مقابل انتقال کلسیم را به میوه‌ها (که تعرق کمتری دارند) را کاهش می‌دهد.

۲. مصرف بهینه آب (مدیریت آبیاری متناسب با فنولوژی رشد) در طول فصل رشد و اجتناب از تنش خشکی (به‌ویژه از زمان گل‌دهی و تشکیل میوه تا پایان ریزش تابستانه) جذب کلسیم و انتقال آن به سمت میوه‌ها و برگ‌های جوان را افزایش می‌دهد. همچنین آبیاری زیاد و مانداب منطقه ریشه نیز جذب کلسیم توسط ریشه و انتقال آن به برگ‌های جوان و میوه‌ها را کاهش می‌دهد. به‌طورکلی در باغ‌های دارای شرایط خاکی رخداد تنش مانداب، زهکشی مناسب کف باغ و خروج آب‌های اضافی از منطقه ریشه بیشترین تأثیر را در سلامت باغ و بهبود کیفیت میوه دارد.

۳. اجتناب از هرس شدید درختان، هرس شدید درختان و مدیریت نامناسب تغذیه پس از هرس موجب رشد شدید سرشاخه‌ها و افزایش اندازه میوه‌ها در سال زراعی پس از هرس خواهد شد که موجب کاهش غلظت کلسیم و کاهش کیفیت انبارمانی میوه‌ها می‌شود لذا توصیه می‌شود هرس به‌تدریج و در طی سال‌های متوالی انجام شود و از هرس شدید و یک‌باره درختان خودداری گردد.

۴. حساسیت به ناهنجاری‌های کمبود کلسیم به ژنتیک (رقم) و شرایط محیطی بستگی دارد بنابراین ارقام و شرایط محیطی می‌توانند در میزان کلسیم میوه‌ها بسیار مؤثر باشند پس مدیریت احداث باغ (رقم و پایه مناسب) و همچنین مدیریت عوامل محیطی در میزان کلسیم میوه‌ها، کنترل و مدیریت ناهنجاری‌های ناشی از کمبود کلسیم از اهمیت زیادی برخوردار است

۵. برای درختان بارده (به‌ویژه درختان مسن) در خاک‌های با بافت سبک (شنی، شن لومی و لوم شنی) و سنگین (رسی، رس شنی، رس سیلتی، لوم رسی شنی، لوم رسی سیلتی و لوم رسی)، خاک‌های شور و خاک‌های در معرض تنش مانداب مصرف نیترات کلسیم به مقدار ۱۵۰ تا ۲۰۰ گرم به ازای هر درخت در دو مرحله به فاصله ۲۰ تا ۳۰ روز در میان در اواسط مرحله اول رشد میوه و اوایل مرحله دوم رشد میوه توصیه می‌شود.

۶. محلول‌پاشی نیترات کلسیم با غلظت سه تا پنج در هزار همراه با اوره با غلظت دو تا سه در هزار، اسید بوریک با غلظت دو تا سه در هزار و مویان مناسب محلول پاشی با غلظت نیم در هزار پس از تشکیل میوه، محلول پاشی نیترات کلسیم با غلظت پنج تا هفت در هزار همراه با اوره با غلظت دو تا سه در هزار، اسید بوریک با غلظت دو تا سه در هزار و مویان مناسب محلول‌پاشی با غلظت نیم در هزار قبل از ریزش تابستانه و محلول‌پاشی نیترات کلسیم با غلظت شش تا هشت در هزار همراه با اوره با غلظت دو تا سه در هزار، اسید بوریک با غلظت دو تا سه در هزار و مویان مناسب محلول‌پاشی با غلظت نیم در هزار از اوایل تا اواسط مرحله دوم رشد میوه به‌ویژه برای ارقامی که قرار است ذخیره‌سازی و انبار شوند توصیه می‌شود

نتیجه‌گیری

به‌طور خلاصه، کلسیم در افزایش رشد ریشه و سرشاخه‌ها، جذب عناصر غذایی، پایداری دیواره سلولی و افزایش تولید نقش مهمی دارد. بنابراین، تغذیه بهینه کلسیم برای سلامتی درختان و بهره‌وری بیشتر باغ‌های مرکبات حیاتی است. نیاز کلسیم درختان مرکبات در مقایسه با دیگر درختان میوه نسبتاً زیاد است. برای رشد بهینه و تولید میوه مطلوب، برگ‌های بالغ درختان مرکبات باید حدوداً سه تا پنج درصد کلسیم (بر اساس وزن خشک) داشته باشند. به‌طورکلی، جذب کلسیم ارتباط تنگاتنگی با تعرق دارد و بنابراین واضح است که اندام‌های دارای تعرق زیاد به‌ویژه برگ‌ها در مقایسه با اندام‌های با تعرق کم مانند میوه‌ها، کلسیم بسیار بیشتری داشته باشند. کلسیم اعمال متعددی در ساختمان بافت گیاهان و همچنین فرآیندهای فیزیولوژیکی دارد و در نتیجه بسیاری از ناهنجاری‌های رشد می‌تواند ناشی از کمبود کلسیم باشد. برگ‌های مرکبات دارای کمبود کلسیم، مقدار کلروفیل کمتری هستند به‌طوری‌که ارتباط خطی بین کلسیم با کلروز در برگ‌های دارای کمبود کلسیم وجود دارد. علاوه بر این کلسیم برای عمل بهینه آنزیم فتوسنتزی روبیسکو (ریبولوز بیس فسفات کربوکسیلاز) مورد نیاز است. کلسیم مانع تجزیه روبیسکو تحت تنش

می‌شود. بنابراین ظرفیت فتوسنتزی پایین در برگ‌های درختان مرکبات با کمبود کلسیم، نتیجه غیرعادی بودن دستگاه فتوسنتزی برگ است. کلسیم همچنین فعالیت کانال‌های یونی که مسئول جذب و انتقال عناصر غذایی در سلول هستند را کنترل می‌کند. بنابراین تأثیر مثبت کلسیم در جذب عناصر کم‌مصرف می‌تواند به علت افزایش بیوماس ریشه و یا بهبود فعالیت کانال‌های یونی است که یون‌های عناصر غذایی را به درون سلول انتقال می‌دهد.

به‌طور کلی جذب کلسیم از ریشه در درختان مرکبات به مناطقی از ریشه محدود می‌شود که حلقه کاسپارین بین سلول‌های آندودرمی وجود ندارد؛ یا تخریب‌شده؛ و یا سلول‌های آندودرمی احاطه‌کننده استوانه مرکزی (استیل) چوب پنبه‌ای نشده‌اند. این مناطق عمدتاً شامل نوک ریشه‌ها و همچنین بخش‌های از ریشه است که در آن جوانه‌های جانبی در حال تشکیل هستند. از طرف دیگر بین شروع رشد ریشه و رشد اندام هوایی اختلاف‌فاز زمانی وجود دارد و رشد جهش‌های رشدی ریشه حدود ۱۵ تا ۲۰ روز پس از جهش‌های رشدی اندام هوایی شروع می‌شود. بنابراین در سال‌هایی که رشد و توسعه سرشاخه‌ها، گل‌ها و میوه-چه‌ها با بارندگی‌های مداوم و طولانی و همچنین ابری بودن طولانی مدت همراه است، به‌ویژه در مناطقی با رطوبت نسبی زیاد مانند سواحل خلیج فارس و دریای مازندران، احتمال اختلال در جذب، انتقال و کمبود کلسیم در بافت‌های در حال توسعه به‌ویژه میوه‌چه‌ها وجود دارد. با توجه به نقش تعرق و جریان شیره خام در آوندهای چوبی در انتقال کلسیم به میوه‌چه‌ها در مرحله اول رشد میوه، غلظت کلسیم در میوه‌چه‌های بیرون تاج بسیار بیشتر از میوه‌چه‌های درون تاج است. بنابراین برای افزایش تعرق و بهبود انتقال جریان شیره خام در آوندهای چوبی و افزایش غلظت کلسیم در میوه‌های درون تاج درختان مرکبات، انجام هرس فرم‌دهی (سرزنی نهال‌ها بلافاصله پس از انتقال به زمین اصلی در زمان احداث باغ و همچنین هرس مناسب سالیانه تا شروع مرحله باردهی) و هرس باردهی (انجام هرس سالیانه قبل از شروع رشد و توسعه مجدد در درختان بارده)

توصیه می‌شود. کلسیم یکی از مهم‌ترین ترکیبات ساختمانی غشاء و دیواره سلولی است و نقش مهمی در فرآیند تقسیم سلولی و رشد دارد. انتقال کلسیم از خاک به میوه‌های در حال توسعه یک فرآیند غیرفعال است و به‌شدت جریان تعرق بستگی دارد. کلسیم به‌طور ضعیف از برگ‌های قدیمی یا دیگر اندام‌های گیاهی به برگ‌ها، میوه‌ها و اندام‌های مریستمی جدید در حال توسعه منتقل می‌شود. بنابراین کمبود کلسیم در خاک یا هر عاملی که در انتقال آن اختلال ایجاد کند (مانند تنش خشکی، تنش مانداب و ...) به ویژه در طول دوره تقسیم سلولی و رشد بحرانی، موجب کمبود کلسیم در میوه‌ها خواهد شد. این کمبود کلسیم یا عدم تعادل عناصر غذایی می‌تواند موجب ناهنجاری‌های فیزیولوژی در پوست مانند شکستن پوست نارنگی‌های کلمانتین یا شکاف خوردن میوه در برخی دیگر از ارقام نارنگی و پرتقال (حساس به شکاف خوردن) شود. بنابراین به‌طور کلی محلول‌پاشی نیترات کلسیم با غلظت سه تا پنج در هزار همراه با اوره با غلظت دو تا سه در هزار، اسید بوریک با غلظت دو تا سه در هزار و مویان مناسب محلول پاشی با غلظت نیم در هزار پس از تشکیل میوه، محلول پاشی نیترات کلسیم با غلظت پنج تا هفت در هزار همراه با اوره با غلظت دو تا سه در هزار، اسید بوریک با غلظت دو تا سه در هزار و مویان مناسب محلول‌پاشی با غلظت نیم در هزار قبل از ریزش تابستانه و محلول‌پاشی نیترات کلسیم با غلظت شش تا هشت در هزار همراه با اوره با غلظت دو تا سه در هزار، اسید بوریک با غلظت دو تا سه در هزار و مویان مناسب محلول‌پاشی با غلظت نیم در هزار از اوایل تا اواسط مرحله دوم رشد میوه به‌ویژه برای ارقامی که قرار است ذخیره‌سازی و انبار شوند پس از آبیاری باغ و رعایت استانداردهای محلول‌پاشی توصیه می‌شود.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید نویسندگان مقاله است.

References

1. Asadi Kangarshahi, A. and Akhlaghi Amiri, N., 2024. Potassium fertilization in citrus orchards. *Journal of Land Management*, 12(1), pp. 57-80. (In Persian) **10.22092/LMJ.2024.363801.345**
2. Asadi Kangarshahi, A. and Akhlaghi Amiri, N., 2023. Management of nitrogen fertilizer application in citrus orchards. *Journal of Land Management*, 11(2), pp. 209-228. (In Persian) **10.22092/LMJ.2023.362505.333**
3. Asadi Kangarshahi, A. and Akhlaghi Amiri, N., 2023. The Effect of Calcium in the Fruit Puffiness Reduction of Satsuma Mandarin (*Citrus unshiu* 'Sugiyama'). *Iranian Journal of Horticultural Science*, 54 (1), pp.157-173. (In Persian) **DOI: <http://doi.org/10.22059/IJHS.2023.339145.2003>**
4. Asadi Kangarshahi, A., 2021. The effect of waterlogging conditions on some chemical and electrochemical changes in soil solution of calcareous soils. *Soil Research*, 35(2), pp. 171-188. (In Persian) **DOI: 10.22092/IJSR.2021.354452.607**
5. Asadi Kangarshahi, A. and Akhlaghi Amiri, N., 2018. Trend of Ca changes in fruit peel and effect of calcium nitrate spray on citrus yield and quality. *Soil Research*, 32(1), pp. 56-72. (In Persian) **DOI: 10.22092/IJSR.2018.116560**
6. Asadi Kangarshahi, A. and Akhlaghi Amiri, N., 2016. Frost in fruit trees (Foundations, Principles and practical strategies to reduce damage). Agricultural Extension and Education Publications. (In Persian)
7. Asadi Kangarshahi, A. and Akhlaghi Amiri, N., 2014a. Advanced and Applied Citrus Nutrition. Agricultural Extension and Education Publications. (In Persian)
8. Asadi Kangarshahi, A. and Akhlaghi Amiri, N., 2014b. Advanced and Applied Citrus Nutrition. Agricultural Extension and Education Publications. (In Persian)
9. Asadi Kangarshahi, A. and Akhlaghi Amiri, N., 2011. Recognition of some environmental damage and physiological disorders of citrus fruits. Technical Journal No. 501, Soil and Water Research Institute. Karaj, Iran. (In Persian)
10. Asadi Kangarshahi, A., 2021. Calcium in fruit Trees (1th ed.). Agricultural Extension and Education Publications. (In Persian)
11. Asadi Kangarshahi, A., 2019. Nutrition Management of Citrus Trees (1th ed.). Agricultural Extension and Education Publications. (In Persian)
12. Asadi Kangarshahi, A. and Akhlaghi Amiri, N., 2012. Die-back, citrus decline and some environmental damages of citrus fruits in East Mazandaran. Extension Technical Publication, Mazandaran Agricultural Jihad Organization. (In Persian)
13. Asadi Kangarshahi, A., Akhlaghi Amiri, N., Mahmoudi, M. and Malkouti, M.J., 2001. Recognition of nutritional disorders in Mazandaran citrus orchards (restrictions and recommendations), I: macro-elements. Technical publication number 268. Agricultural education publication. Agricultural Research and Training Organization, Ministry of Agriculture, Karaj, Iran. (In Persian)
14. Asadi Kangarshahi, A. and Akhlaghi Amiri, N., 2008a. Effect of short-term water logging on the growth and yield of citrus. *The 11th International Citrus Congress*, Wuhan, China.
15. Asadi Kangarshahi, A., & Akhlaghi Amiri, N., 2008b. Investigation of physicochemical condition and fertilization methods to citrus gardens of Mazandaran, Iran. *11th International Citrus Congress (ICC2008)*. Hubei, China.
16. Bashour, I. and Sayegh, A.A., 2007. Methods of Analysis for Soils of Arid and Semi-Arid Regions. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, pp. 49-53.
17. Basirat, M., Haghighatnia, H. and Mousavi, S. M., 2018. Evaluation and determination the nutritional status of Valencia orange orchards in south of Fars province. *Journal of Water and Soil*, 32, pp. 143-54. (In Persian) **doi: 10.22067/jsw. v32i1.67597**
18. Bramlage, W.J., 1994. Physiological role of calcium in fruit. pp. 101-107. In: A.B. Petersen, R.G. Stevens (eds) *Tree fruit nutrition*, Good fruit grower, Yakima, WA.
19. Demarty, M., Morvan, C., and Thellier, M., 1984. Calcium and the cell wall. *Plant, Cell and Environment*, 7, pp. 441-448.
20. FAO, 2016. FAO Soils Portal: Management of Calcareous Soils (accessed 01.04.16).

21. Freitas, S.T., and Mitcham, E. J., 2012. Factors involved in fruit calcium deficiency disorders. *Horticultural Reviews*, 40, pp. 107–146.
22. Freitas, S.T., Jiang, C.Z., and Mitcham, E.J., 2012. Mechanisms involved in calcium deficiency development in tomato fruit in response to gibberellins. *Journal of Plant Growth Regulation*, 31, pp. 221–234.
23. Freitas, S.T., Shackel, K.A., and Mitcham, E.J., 2011. Absciscic acid triggers whole-plant and fruit-specific mechanisms to increase fruit calcium uptake and prevent blossom end rot development in tomato fruit. *Journal of Experimental Botany*, 62, pp. 2645–2656.
24. Gilliham, M., Dayod, M., Hocking, B.J., Xu, B., Conn, S.J., Kaiser, B.N., Leigh, R.A. and Tyerman, S.D., 2011. Calcium delivery and storage in plant leaves: exploring the link with water flow. *Journal of Experimental Botany*, 62, pp. 2233–2250.
25. Gottwald, T.R., Graça, J.V. and Bassanezi, R.B., 2007. Citrus Huanglongbing: the pathogen and its impact. *Plant Health Progress*. Available from: [http://dx.doi.org/10.1094/ PHP-2007-0906-01-RV](http://dx.doi.org/10.1094/PHP-2007-0906-01-RV)>. Accessed: 15 Feb. 2017.
26. Grierson, W. 1981. Physiological disorders of citrus fruits. *Proc. Int. Soc. Citriculture*. 3: 764–767.
27. Hirschi, K.D., 2004. The calcium conundrum. Both versatile nutrient and specific signal. *Plant Physiol*, 136, pp. 2438–2442.
28. Hocking, B., Tyerman, S.D., Burton, R.A. and Gilliham, M., 2016. Fruit calcium: Transport and physiology. *Frontiers in Plant Science*, 7, pp. 569–576.
29. Huang, W., Shi, Y., Yan, H., Wang, H., Wu, D., Grierson, D., & Chen, K., 2023. The calcium-mediated homogalacturonan pectin complexation in cell walls contributes the firmness increase in loquat fruit during postharvest storage. *Journal of Advanced Research*, 49, pp. 47–62. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2022.09.009>
30. Hopkins, W.G. and Huner, N.P.A., 2004. Plant and Inorganic Nutrient. In *Introduction to Plant Physiology*. 3rd ed. John Wiley and Sons. Inc. Publishers, pp. 241–257.
31. Jaime, M, Álvarez-Herrera, J.G. and Fischer, G., 2024. Effect of calcium on fruit quality: A review. *Agron. Colomb*, 42, 1, DOI: 10.15446/agron.colomb.v42n1.112026
32. Larson, K.D., Graetz, D.A., and Schaffer, B., 1991. Flood-induced chemical transformations in calcareous agricultural soils of South Florida. *Soil Sci*, 152, pp.33–40.
33. Lecourieux, D., Ranjeva, R. and Pugin, A., 2006. Calcium in plant defence-signalling pathways. *New Phytologist*, 171, pp. 249–269.
34. Lemtiri-Chlieh, F. and MacRobbie, E.A.C.J., 1994. Role of calcium in the modulation of Vicia guard cell potassium channels by abscisic acid: a patch-clamp study. *The Journal of Membrane Biology*, 137, pp. 99–107.
35. Marschner, H., 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 2nd ed. Academic Press, London.
36. McAinsh, M.R. and Pittman, J.K., 2009. Shaping the calcium signature. *The New Phytologist*, 181, pp. 275–294.
37. Narteh, L.T. and Sahrawat, K.L., 1999. Influence of flooding on electrochemical and hemical properties of West African soils. *Geoderma*, 87, pp.179–207.
38. Olle, M., and Bender, I. 2009. Causes and control of calcium deficiency disorders in vegetables: A review. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 84, pp. 577–584.
39. Rahman, M. and Punja, Z.K., 2002. Calcium and plant disease. In: Datnoff L.E. et al. (eds). *Mineral nutrition and plant disease*. The American Phytopathological Society, St. Paul.
40. Rudd, J.J., and Franklin-Tong, V.E. 1999. Calcium signaling in plants. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 55, pp. 214–232.
41. Saure, M.C. 2005. Calcium translocation to fleshy fruit: Its mechanism and endogenous control. *Scientia Horticulturae*, 105, pp. 65–89.
42. Schlegel, T.K. and Schonherr, J. 2002. Penetration of calcium chloride into apple fruits as affected by stage of fruit development. *Acta Hort*, 594, pp. 527–533.
43. Srivastava, A. K. 2012. Integrated nutrient management in Citrus. In: Srivastava AK (Ed). *Advances in Citrus nutrition*. Dordrecht: Springer. PP, 369.

44. Srivastava, A.K., 2013. Nutrition deficiency symptomology in citrus: An effective diagnostic tool or iust an aid for post-mortem analysis. *Agricultural Advances*, 2, pp. 177-194.
45. Storey, R. and Treeby, M.T., 2002. Nutrient uptake into navel oranges during fruit development. *J. Hort. Sci. Biotech*, 77, pp. 91-99.
46. Storey, R., Treeby, M.T., and Milne, D.J., 2002. Crease: another Ca deficiency-related fruit disorder. *J. Hort. Sci. Biotech*, 77, pp. 565-571.
47. Taalab, A.A., Ageeb, G. W., Siam, H.S., and Mhmoud, S.A., 2019. Some characteristics of calcareous soils. A review. *Middle East Journal of Agriculture*, 8, pp. 96-105.
48. Tadesse, T., Nichols, M.A., Hewett, E.W., and Fisher, K.J. 2001. Relative humidity around the fruit influences the mineral composition and incidence of blossom-end rot in sweet pepper. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 76, pp. 9–16.
49. Taylor, M.D., and Locascio, S.J., 2004. Blossom-end rot: A calcium deficiency. *Journal of Plant Nutrition*, 27, pp. 123–139.
50. Tehrani, M. M., and Ghaffari Nejad, S. A. 2016. Formulation for investigation and monitoring of soil fertility and nutrition condition of agron, mic and horticultural crops. Report 50731. Karaj, Iran: Ministry of Jihad Agriculture. Agricultural Research, Education and Extension Organization, Soil and Water Research Institute. (In Persian)
51. Wallace, A. and Mueller, T., 1980. Calcium uptake and distribution in plants. *Journal of Plant Nutrition*, 162, pp. 247–256.
52. White, P. J. and Broadley, M. R., 2003. Calcium in plants. *Annals of Botany*, 92, pp. 487–511.
53. White, P.J., 2001. The pathways of calcium movement to the xylem. *Journal of Experimental Botan*, 52, pp. 891–899.
54. Xuan, H., Streif, J., Saquet, A., Römheld, V., and Bangerth, F., 2005. Application of boron with calcium affects respiration and ATP/ADP ratio in ‘Conference’ pears during controlled atmosphere storage. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 80, pp. 633–637.
55. Yang, L., Li, G., Lin, Q. and Zhao, X., 2010. Active carbonate of chestnut soils in different lands. *Ecol. Environ. Sci.*, 19, pp. 428 – 432.
56. Zhang, L., Wang, P., Chen, F., Lai, S., Yu, H., & Yang, H., 2019. Effects of calcium and pectin methylesterase on quality attributes and pectin morphology of jujube fruit under vacuum impregnation during storage. *Food Chemistry*, 289, pp. 40–48.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.008>

Calcium Physiology and Its Application Management in Citrus Orchards

A. Asadi Kangarshahi *  and N. Akhlaghi Amiri

Associate Prof., Soil and Water Research Department, Mazandaran Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Sari, Iran. kangarshahi@gmail.com

Assistant prof., Agronomy and Horticultural Science Department, Mazandaran Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Sari, Iran. neginakhlghi@yahoo.com

Received: October 2024 and Accepted: February 2025

Abstract

It is the objective of the present study to explore calcium fertilization management in citrus orchards in an attempt to improve fruit quality via the more profound understanding thus gained about plant calcium requirements, proper amount and timing of fertilization, and processes of calcium absorption and transfer to leaves and fruits in the trees. It is well established that calcium concentration in citrus fruits is only second to potassium and nitrogen but that it is the first in terms of quantity in the biomass of citrus trees (compared to potassium and nitrogen). The amount of calcium harvested by fresh citrus fruit is about 550 to 600 gr per ton. The post-setting developing fruits have an immediate and stable need for calcium, which is supplied by the xylem vessels and strongly depends on transpiration from the surface of xylem tissues and organs. It, therefore, follows that unfavorable climatic conditions and management practices leading to such adverse situations as drought stress, flooding stress, heat stress, lack of sunny hours, high relative humidity, or high nitrogen and potassium fertilizer application in the first stage of fruit growth (I) only intensify calcium deficiency in the developing tissues. Study has shown that the most appropriate timing for fertilizer application to increase calcium content in citrus fruits is the first and early second stages of fruit growth, beyond which time calcium efficiency and transfer to fruits undergo drastic drops. On the other hand, calcium enjoys the greatest impacts not only on enhancing fruit tissue firmness but also on preventing their softening, reduced fruit weight, physiological disorders, and fruit rotting percentage during storage. Thus, to achieve these goals of calcium fertilization, previous research in different regions of the world and in Iran recommend that the first stage of fruit growth (from post-setting to June drop) and early to mid-second stage of fruit growth (II) may be the best timing for calcium fertilizer application (foliar application or fertigation) to increase calcium content in citrus fruits. It is further recommended that Ca application during late second stage of fruit growth and pre-harvest period or post-harvest fruit immersion in calcium solutions must be avoided.

Key words: Ca absorption trend, Ca fertilizers, Ca requirement, Fruit growth phenology

* - Corresponding author's email: kangarshahi@gmail.com
<https://doi.org/10.22092/lmj.2025.367308.369>

Arsenic removal from soil and water by biochar: A promising environmentally-friendly approach

A. Reyhanitabar* 

Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
areyhani@tabrizu.ac.ir

Received: July 2024 and Accepted: February 2025

Abstract

Contamination of water and soil resources with the metalloid arsenic (As) nowadays poses a major threat to human health. According to the World Health Organization (WHO), it is not only a carcinogenic substance in humans but also a toxic substance to plants. As removal from soils comprises a variety of physical, chemical, and biological methods, each with its own advantages and disadvantages. Biochar is produced through thermochemical treatment of agricultural residues, urban solid waste, and livestock manure. As one promising solution to As contamination, biochar is generally used to achieve the four major goals of enhanced soil fertility, elevated carbon sequestration in soil, restoration of degraded lands, and soil and water pollution management. Little has been reported in the literature on data-based studies concerning As immobilization in soils; however, the newly emerging areas of interest include investigation of biochar impact mechanisms on water and contaminated soils as well as industrial-scale applications of research findings. The present study begins with a brief description of the metalloid arsenic chemistry in soil and water to proceed with a review of research findings on biochar and arsenic interactions. In this regard, the initial biomass type and pyrolysis conditions are discussed as the determining factors in such interactions. It is argued that arsenic speciation contained in water and soil may influence its mobility, bioavailability, and transfer in the presence of biochar due to soil chemistry variability, which is largely an under-investigated area in the literature. This specifically stresses the need for studies to explore biochar interactions with soil microbes in immobilizing toxic arsenic species. Another gap detected in the studies concerns the cost-benefit analysis of biochar application as a water and soil decontamination method.

Keyword: Arsenic, Biochar, Plant, Soil, Water

* - Corresponding author's email: areyhani@tabrizu.ac.ir
<https://doi.org/10.22092/lmj.2025.365884.360>

Investigation of some of the most important challenges facing agricultural lands in Khuzestan Province (Limitations of soil resources)

A. Azadi ^{*} , A. Jafarnejadi, and M. Goosheh

Assistant Prof., Khuzestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ahvaz, Iran. a.azadi@areeo.ac.ir

Associate Prof., Khuzestan Agricultural and Natural Resources, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ahvaz, Iran. arjafarnejadi@gmail.com

Assistant Prof., Khuzestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ahvaz, Iran. amgoosheh@gmail.com

Received: August 2024 and Accepted: July 2025

Abstract

Study of soil conditions in agricultural lands and natural resources is essential for achieving both optimal resource management and maximum economic productivity. Studying the current soil conditions in Khuzestan Province, the present article investigates the most important challenges facing soil resources in Khuzestan Province and their limitations. The results of the ten-year (2011-2021) study based on approximately 1100 surface soil samples revealed that soil salinity in agricultural lands of the province is on the rise while absorbable nutrients and organic carbon concentrations are basically declining in the soils studied. This indicates that, despite all the management measures taken, soil conditions in the province do not favor agricultural production, which may be mainly attributed to soil resources mismanagement and improper planning. Moreover, about 200 study pedons from 140 land visits were reviewed to extract the distribution and percentages of land classes for each year of the study period. The results indicate that the highest number of land use change requests each year are recorded for new industrial developments and establishment of workshops and factories, tourism projects, fish and shrimp farming, national housing boom, and, finally, greenhouses. The range of changes in the land classes studied varies from class I (Arable) to VI (non- Arable) with different subclasses but the highest distribution of classes each year is related to classes V (undetermined Arable and with severe limitation) and III (Arable with moderate limitation). The majority of the V classes are spatially dispersed across the province, especially in the southern and western regions (such as the cities of Abadan, Mahshahr, etc.) and are related to soil salinity and alkalinity as soil limitations. It is, therefore, essential to localize and revise the methodology employed to determine the cultivability of agricultural lands and apply methods based on scientific findings and accurate expert experiences in order to prevent land use changes and to improve upon the preservation and management of lands with salinity and alkalinity problems. Thus, salinity, poor soil organic matter, reduced fertility, and erosion may be regarded as the major problems facing soil management in the province. It follows then that development of proper soil management measures and the related policies, enhanced investment in sustainable soil management, implementation of soil studies with special focus on effective training and education, and expansion of soil programs must be placed on any priority list.

Keywords: Salinity, Land use, Agriculture, Soil limitations

* - Corresponding author's email: a.azadi@areeo.ac.ir

<https://doi.org/10.22092/lmj.2025.366322.361>

Impacts of soil compaction on crop yield and economic value of arable lands

J. Mirzavand, Kh. Shahbazy, A. Majidi, and Z. Kazemi* 

Assistant Prof., Soil and Water Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Zarghan, Iran. j.mirzavand@areeo.ac.ir
Associate Prof., Forests and Rangelands Research Institute, Agricultural and Natural Resources Research and Education Organization, AREEO, Tehran, Iran. khosrw_shahbazi@yahoo.com
Associate Prof., Soil and Water Research Department, West Azerbaijan, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Uromia, Iran. a.majidi@areeo.ac.ir
PhD in Soil Physics and Conservation, Soil Science Department, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran. zkazemi2016@gmail.com

Received: June 2024 and Accepted: February 2025

Abstract

Declining crop yield and resource efficiency are the direct and indirect adverse effects of soil compaction, which affect the profitability of agricultural systems. Soil compaction impresses soil structure by reducing air-filled porosity, increasing soil bulk density and mechanical resistance, and reducing total porosity. The present review article explores the various studies focused on the effects of different tillage systems on soil compaction and their impacts on yield and economic value of land. The studies reviewed show that between 70-80% of soil compaction occurs during the first passage of agricultural machinery on land and that reduced crop yield due to soil compaction reportedly falls within the range of 5-75%. One study predicted the average financial losses due to soil compaction in Ukraine and Lithuania to be 49 and 13 euros per hectare per year, respectively. The financial cost of soil compaction caused by spreading liquid fertilizer weighing more than 18 Mg with a heavy tanker exerting a pressure of more than 200 kPa on wet soil in early spring in Canada was reportedly estimated at 30 to 300 dollars per hectare and the increase in wheel loads of agricultural machines from 1 MPa to 9 MPa in Sweden reduced the net income of agricultural land by 25%. This is while the use of a No-Tillage system has been reported to lead to economic savings, increased energy efficiency, and reduced greenhouse gas emissions, which in most cases, leads to an increase in crop yield per unit area.

Keywords: Air filled porosity, Bulk density, Soil structure, Greenhouse gases, and Soil mechanical resistance

* - Corresponding author's email: zkazemi2016@gmail.com
<https://doi.org/10.22092/lmj.2025.364922.359>

Modeling the factors affecting farmers' Intention to implement the land consolidation plan

M. Savari* , **A. Savari Mombeni**, and **A. M. Bondori**

Associate Prof., Department of Agricultural Extension and Education, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran. Savari@asnrukh.ac.ir

PhD, Department of Agricultural Extension and Education, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran. amenhsavari@yahoo.com

PhD Student of Sustainable Agricultural Extension and Education, Agricultural Science and Natural Resources University of Khuzestan. Mollasani, Iran. bondori@asnrukh.ac.ir

Received: January 2025 and Accepted: July 2025

Abstract

The theory of planned behavior was used in this study to model the factors affecting farmers' intention to implement the land consolidation plan. For this purpose, use was made of a descriptive-correlation method based on the structural equation model. The statistical population included farmers in Miyanab District of Shushtar County (N=1400). A sample size of 301 people was adopted based on the Krejci and Morgan table while sampling was carried out using a stratified-random method. The data collection tool was a questionnaire, whose validity was confirmed based on expert opinion by university academic members and its reliability was endorsed through Cronbach's alpha. Also, the average variance extracted (AVE) index was used to determine construct validity while composite reliability (CR) and homogeneity reliability (Rho) indices were used to determine model reliability. The data collected were analyzed using SPSS26 and Smart PLS3 software. The results of the structural equation model showed that the variables attitude, subjective norms, and perceived behavioral control predicted 63% of the changes in farmers' intention to implement the land consolidation plan. In addition, farmer attitude and subjective norms explain 47% of the changes in perceived behavioral control and the subjective norm variable explains 37% of the changes in farmer attitude towards implementing the land consolidation plan.

Keywords: Farmers, Land consolidation, Attitude, Subjective norm, perceived behavioral control

* - Corresponding author's email: Savari@asnrukh.ac.ir
<https://doi.org/10.22092/lmj.2025.368138.378>

Effects of biochar and phosphorus on some agronomical traits of rapeseed (*Brassica napus* L.) and the associated water use efficiency in an alkaline loam soil

S. Salimi Trazoj, A. Reyhanitabar*  and N. Najafi

MSc Student of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

soheilsalimi70@yahoo.com

Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

areyhani@tabrizu.ac.ir

Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

nanajafi@yahoo.com

Received: November 2024 and Accepted: February 2025

Abstract

The effects of the combined application of biochar pyrolysed at 300 °C and phosphorous (P) fertilizer on some agronomical and morphological traits of the Hyola 308 cultivar of rapeseed (*Brassica napus* L.) as well as the associated water use efficiency were studied in an alkaline loam soil. For this purpose, a factorial experiment was conducted in a completely randomized design with three replicates. The factors were organic matter with two sources (biochar and wheat straw) at three levels (0, 20, and 40 g kg⁻¹) and three levels of phosphorus (0, 20, and 40 mg kg⁻¹ as triple superphosphate fertilizer). Prior to harvesting, leaf chlorophyll index and leaf area were measured while shoot, root, and seed dry matter as well as water use efficiency, plant height, stem diameter, root volume, number of pods, one-thousand seed weight, seed oil content, and seed protein concentration were measured after the harvest. The results showed that application of phosphorus and both levels (2% and 4% of biochar significantly increased leaf chlorophyll index, stem height, number of pods, one-thousand seed weight, water use efficiency, protein and seed oil contents as well as shoot, root, and seed dry matter contents compared to the control; application of wheat straw, however, led to decreases in these traits except for water use efficiency. Moreover, compared to the initial biomass, the biochar obtained from wheat straw pyrolyzed at 300 °C in an alkaline loam soil improved rapeseed agronomical and morphological traits in an alkaline loam soil.

Keywords: Biochar, Phosphorus fertilizer, Rapeseed, Wheat straw

* - Corresponding author's email: areyhani@tabrizu.ac.ir
<https://doi.org/10.22092/lmj.2025.367559.371>

Using the fuzzy Delphi Technique to Investigate the Factors Involved in Agricultural Land Use Change in Iran

M. Asimeh and A. Azadi * 

PhD Student in Agricultural Development, Faculty of Agriculture, Yasouj University, Yasouj, Iran.

asimeh@gmail.com

Assistant Prof., Khuzestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ahvaz, Iran.

a.azadi@areeo.ac.ir

Received: November 2024 and Accepted: April 2025

Abstract

Agricultural land use conversion and its aggravating factors form an environmental challenge only second to water scarcity as the fundamental problem in the Iranian agricultural arena. It is, therefore, essential to identify the factors underlying land use change. The present study strives to explore the factors that lead to agricultural land use change to such uses as recreational and housing developments in Iran. For the purposes of this study, questionnaires were given to 12 experts in land use assessment and change selected from the Agricultural and Natural Resources Research and Education Centers from across Iran using the purposive and snowball sampling methods alongside the fuzzy Delphi technique in two stages. From the 72 indicators extracted from the expert consensus achieved, 28 in four groups (economic, social-cultural, legal-institutional, and environmental-infrastructure) were selected based on expert opinion as the most significant factors affecting land use change. The results showed that the legal and institutional factor was more important; more specifically, lack of proper planning by the government to preserve agricultural lands, lack of definitive reaction by the authorities to land use changers, and reliance of organizations and departments on the revenues exacted from land use change ranked first to third in this dimension, with weights of 0.0992, 0.0973, and 0.0968, respectively. Thus, these factors can evidently play decisive roles in managing agricultural land use change. It was, furthermore, found instructive that the government should adopt measures to review and update the current land governance structure, review and revise the gaps in the relevant laws and the existing regulatory provisions, prevent fragmentation of agricultural lands, raise awareness among the rural communities regarding the advantages of preserving current agricultural land uses, and alert them about the dire consequences of such changes.

Keywords: Land use, Agricultural land, Iran, Fuzzy Delphi, Snowball sampling method

* - Corresponding author's email: a.azadi@areeo.ac.ir
<https://doi.org/10.22092/lmj.2025.367588.372>

Subject	Page
Using the fuzzy Delphi Technique to Investigate the Factors Involved in Agricultural Land Use Change in Iran.....	1
<i>M. Asimeh and A. Azadi</i>	
Effects of biochar and phosphorus on some agronomical traits of rapeseed (Brassica napus L.) and the associated water use efficiency in an alkaline loam soil.....	2
<i>S. Salimi Trazoj, A. Reyhanitabar and N. Najafi</i>	
Modeling the factors affecting farmers' Intention to implement the land consolidation plan.....	3
<i>M. Savari, A. Savari Mombeni, and A. M. Bondori</i>	
Impacts of soil compaction on crop yield and economic value of arable lands.....	4
<i>J. Mirzavand, Kh. Shahbazy, A. Majidi, and Z. Kazemi</i>	
Investigation of some of the most important challenges facing agricultural lands in Khuzestan Province (Limitations of soil resources).....	5
<i>A. Azadi, A. Jafarnejadi, and M. Goosheh</i>	
Arsenic removal from soil and water by biochar:A promising environmentally-friendly approach.....	6
<i>A. Reyhanitabar</i>	
Calcium Physiology and Its Application Management in Citrus Orchards.....	7
<i>A. Asadi Kangarshahi and N. Akhlaghi Amiri</i>	

**Ministry of Jihad-e-Agriculture
Agricultural Research, Education and Extension Organization
Soil and Water Research Institute**

Journal of Land Management

***Vol. 13, No. 1*
2025**

**Manager-in-Charge: Hadi Asadi Rahmani, PhD
Director General, Soil and Water Research Institute**

**Editor-in-Chief: Hossein Besharati, PhD
Professor, Soil and Water Research Institute**

Editorial Board

Naser Aliasgharzad, PhD	Professor, Faculty of Agriculture, Tabriz University
Hossein Asadi, PhD	Professor, College of Agriculture and Natural Resources, Tehran University
Hossein Besharati, PhD	Professor, Soil and Water Research Institute
Hossein A. Bahrami, PhD	Professor, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modarres University
Mohammad R. Balali, PhD	Assistant Prof., Soil and Water Research Institute
Manuchehr Gorji, PhD	Professor, College of Agriculture and Natural Resources, Tehran University
Mohammad A. Hajabbasi, PhD	Professor, Faculty of Agriculture, Isfahan Industrial University
Mohammad H. Mohammadi, PhD	Associate Prof., College of Agriculture and Natural Resources, Tehran University
Aziz Momeni, PhD	Associate Prof., Soil and Water Research Institute
Mohammad H. Roozitalab, PhD	Professor, Agricultural Research, Education and Extension Organization
Saeed Saadat, PhD	Associate Prof., Soil and Water Research Institute
Mohammad R. Shahpasand, PhD	Associate Prof., Imam Khomeini Higher Education Center

Executive Manager:	Farhad Moshiri, PhD
English Editor :	Ezatollah Roustazadeh, PhD
Design:	Eng. Fatemeh Aghajani

**Postal Address: P. O. Box: 317793545, Karaj – IRAN
Tel / Fax: 026-36220160
Soil and Water Research Institute Website: www.swri.ir
Journal Website: <http://lmj.areo.ir>**

Journal of Land Management



ISSN: 2345-6205

Volume 13/ No. 1/ 2025

Subject	Page
Using the fuzzy Delphi Technique to Investigate the Factors Involved in Agricultural Land Use Change in Iran.....	1
<i>M. Asimeh and A. Azadi</i>	
Effects of biochar and phosphorus on some agronomical traits of rapeseed (<i>Brassica napus</i> L.) and the associated water use efficiency in an alkaline loam soil.....	2
<i>S. Salimi Trazoj, A. Reyhanitabar and N. Najafi</i>	
Modeling the factors affecting farmers' Intention to implement the land consolidation plan.....	3
<i>M. Savari, A. Savari Mombeni, and A. M. Bondori</i>	
Impacts of soil compaction on crop yield and economic value of arable lands.....	4
<i>J. Mirzavand, Kh. Shahbazy, A. Majidi, and Z. Kazemi</i>	
Investigation of some of the most important challenges facing agricultural lands in Khuzestan Province (Limitations of soil resources).....	5
<i>A. Azadi, A. Jafarnejadi, and M. Goosheh</i>	
Arsenic removal from soil and water by biochar: A promising environmentally-friendly approach.....	6
<i>A. Reyhanitabar</i>	
Calcium Physiology and Its Application Management in Citrus Orchards.....	7
<i>A. Asadi Kangarshahi and N. Akhlaghi Amiri</i>	