



انجمن علوم خاک ایران

نشریه علمی



موسسه تحقیقات خاک و آب

پژوهش‌های خاک

(علوم خاک و آب)

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

ISSN: 2228 -7124

الف / جلد ۳۷ / شماره ۴ سال ۱۴۰۲

صفحه

فهرست

عنوان

ارزیابی تناسب اراضی و بررسی محدودیت‌ها برای کشت گیاهان صنعتی در مناطق تحت کشت آبی کشور..... ۳۱۰

میرناصر نویدی و جواد سیدمحمدی

فرا تحلیل نتایج پژوهش‌های تاثیر مصرف کودهای دامی، زیستی و نیتروژن بر صفات کمی و کیفی چغندر قند..... ۳۲۶

سمر خیامیم، حمید نوشاد، بابک بابایی، اباذرجبی و شهرام خدادادی

بررسی برخی از ویژگی‌های شیمیایی، مورفولوژیکی و خطرات آلودگی فلزات سنگین در لجن فاضلاب و بیوپار آن در دماهای

مختلف..... ۳۴۱

فروغ خائفی، علیرضا حسین پور و حمیدرضا متقیان

ارزیابی کارایی تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های طیفی در برآورد رطوبت خاک منطقه تلو در استان تهران..... ۳۵۴

مرتضی میری، علی اکبر نوروزی، عبدالنبی عبده کلاهچی و جهانگیر پرهمت

ارزیابی روش‌های نمره‌دهی و وزن‌دهی ویژگی‌های خاک برای تعیین کیفیت آن در کاربری‌های مختلف..... ۳۷۵

فاطمه سمیع خشک اسطلخی، نفیسه یغمائیان، سپیده ابریشم‌کش و عطااله مصلحت‌جو

پایش تغییرات تنفسی خاک لوم‌شنی آلوده به نفتا سبک در تیمارهای مختلف زیست‌پالایی..... ۳۹۳

زکیه عافیت، مریم نوروزپور، محمدرضا ساریخانی و ناصر علی‌اصغرزاد

وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

انجمن علوم خاک ایران

مؤسسه تحقیقات خاک و آب

نشریه علمی
پژوهش‌های خاک

جلد ۳۷ شماره (۴)

۱۴۰۲

صاحب امتیاز: مؤسسه تحقیقات خاک و آب

تأییدیه درجه علمی

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

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

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

اعضاء هیأت تحریریه (به ترتیب حروف الفبا):

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

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

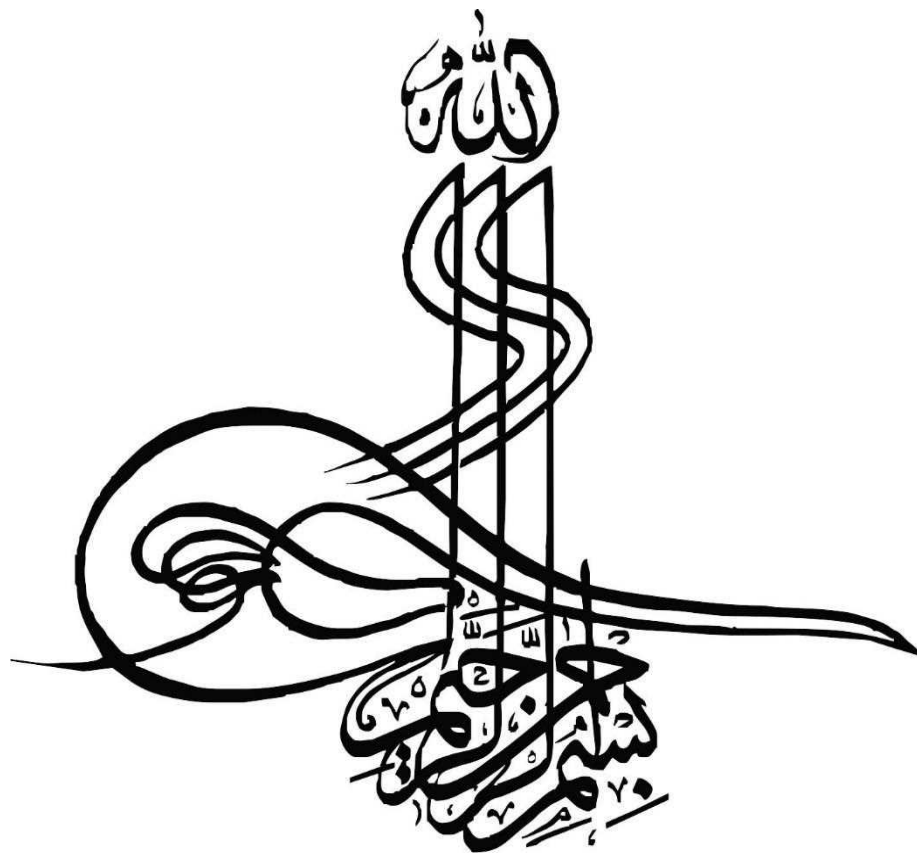
دکتر حمید سیادت
مهندس کیانا خامه‌چی
چهار شماره

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

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

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

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



ارزیابی تناسب اراضی و بررسی محدودیت‌ها برای کشت گیاهان صنعتی در مناطق تحت کشت آبی کشور..... ۳۱۰

میرناصر نویدی و جواد سیدمحمدی

فرا تحلیل نتایج پژوهش‌های تاثیر مصرف کودهای دامی، زیستی و نیتروژن بر صفات کمی و کیفی چغندر قند..... ۳۲۶

سمر خیامیم، حمید نوشاد، بابک بابایی، اباذر رجبی و شهرام خدادادی

بررسی برخی از ویژگی‌های شیمیایی، مورفولوژیکی و خطرات آلودگی فلزات سنگین در لجن فاضلاب و بیوپار آن در دماهای

مختلف..... ۳۴۱

فروغ خائفی، علیرضا حسین پور و حمیدرضا متقیان

ارزیابی کارایی تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های طیفی در برآورد رطوبت خاک منطقه تلو در استان تهران..... ۳۵۴

مرتضی میری، علی اکبر نوروزی، عبدالنبی عبده کلاهچی و جهانگیر پرهمت

ارزیابی روش‌های نمره‌دهی و وزن‌دهی ویژگی‌های خاک برای تعیین کیفیت آن در کاربری‌های مختلف..... ۳۷۵

فاطمه سمیع خشک اسطلخی، نفیسه یغمائی‌ان، سپیده ابریشم‌کش و عطااله مصلحت‌جو

پایش تغییرات تنفسی خاک لوم‌شنی آلوده به نفتا سبک در تیمارهای مختلف زیست‌پالایی..... ۳۹۳

زکیه عافیت، مریم نوروزپور، محمدرضا ساریخانی و ناصر علی‌اصغرزاد

راهنمای تهیه مقاله برای انتشار در نشریه علمی پژوهش‌های خاک

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

الف) اصول کلی

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

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

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

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

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

ب) نحوه تهیه و ارسال مقاله

نحوه نگارش مقاله

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

ستونی در نرم افزار Word 2007 تایپ شود.

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

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

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

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

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

شناسنامه مقاله

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

برگ شناسه

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

عنوان مقاله

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

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

واژه‌های کلیدی:

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

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

مقدمه

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

مواد و روش‌ها

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

نتایج

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

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

بحث

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

تشکر و قدردانی

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

فهرست منابع

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

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

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

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

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

مثال‌های برای تنظیم منابع

مقاله از مجله

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

مقاله از کارگاه آموزشی یا علمی

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

مطلب از کتاب

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

مطلب نقل شده یک نویسنده در یک مجموعه مقالات

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

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

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

ذکر مطلب از اینترنت

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

منابع مورد استفاده در متن بدین صورت نگاشته شوند:

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

اسمیت (۲۰۰۲) گزارش کرد ...

اسمیت و جونز (۲۰۰۲) گزارش کردند...

اسمیت و همکاران (۲۰۰۲) گزارش کردند...

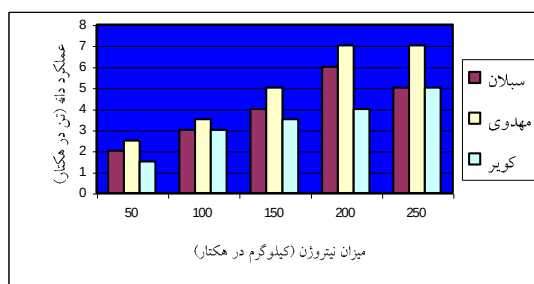
– در صورت عدم رعایت دقیق مطالب فوق‌الذکر، مقاله پذیرفته نمی‌شود و پیش از بررسی به اطلاع نویسنده مسئول می‌رسد. بدیهی است چنانچه مقاله ارسالی با شرایط ذکر شده تهیه و عودت داده شود مجدداً از زمان برگشت که تاریخ واقعی مقاله منظور می‌شود مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

جدول نامناسب

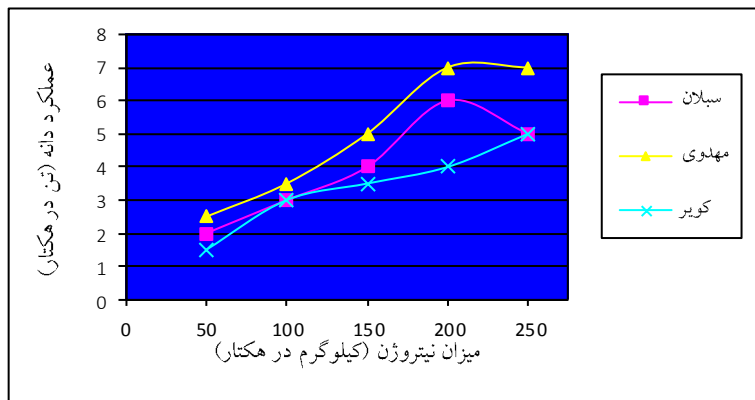
عمق (cm)	pH	EC (dS. m- 1)	TNV (%)	OC (%)	Pava il	Kavail .	Mge xch	بافت
۰-۳۰	۸/۲	۷/۶	۲۸	۰/۶۲	۳/۶	۲۹۰	۳۰۰	لومی رسی
۳۰-۶۰	۸/۲	۷/۲	۳۰	۰/۵۰	۰/۶	۲۹۵	۳۰۵	لومی رسی
۶۰-۹۰	۷/۸	۹/۵	۳۳	۰/۲۱	۰/۵	۳۳۲	۲۸۶	لومی شنی

جدول مناسب

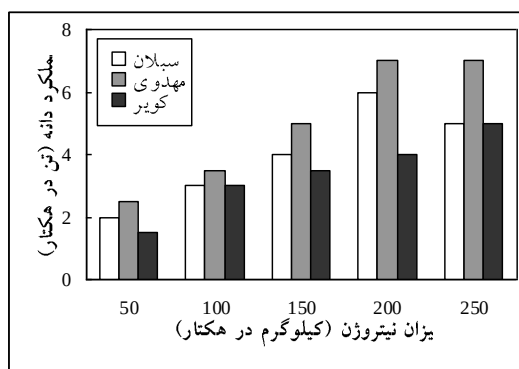
عمق (cm)	pH	EC (dS.m ⁻¹)	TNV (%)	OC (%)	P _{av}	K _{av}	Mg _{ex}	بافت
					(mg.kg ⁻¹)			
0-30	8/3	7/6	28	0/60	3/6	290	300	لومی رسی
30-60	8/2	7/2	30	0/50	/60	295	305	لومی رسی
	7/8	9/5	33	0/21	/50	232	286	لومی شنی



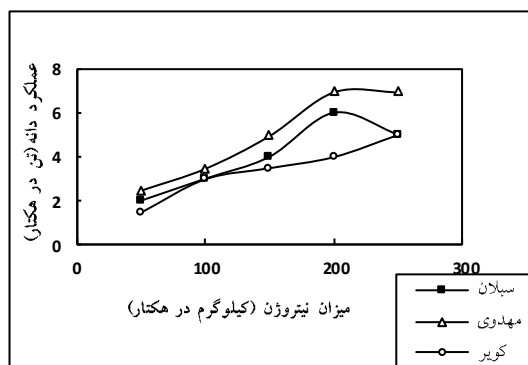
«نامناسب»



«مناسب»



«نامناسب»



«مناسب»

((نشریه پژوهش‌های خاک))

فرم تعهد نامه

نشریه پژوهش‌های خاک

اینجانب نویسنده مسئول مقاله زیر:

- سال‌های اجراء آزمایش ذکر شود

موارد زیر را به آگاهی می‌رسانم:

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

نام نام خانوادگی نویسنده اول: امضاء نویسنده اول مقاله

نام نام خانوادگی نویسنده دوم: امضاء نویسنده دوم مقاله

نام نام خانوادگی نویسنده سوم: امضاء نویسنده سوم مقاله

نام نام خانوادگی نویسنده چهارم: امضاء نویسنده چهارم مقاله

اسامی داوران	تعداد داوری
دکتر کامران افتخاری	۲
دکتر کامبیز بازرگان	۲
دکتر حسین بشارتی	۱
دکتر یحیی پرویزی	۲
دکتر علیرضا جعفرنژادی	۱
دکتر مصطفی حسین پور	۱
دکتر هوشنگ خسروی	۳
دکتر حسن رمضانپور	۱
دکتر علی زین الدینی	۱
دکتر فریدون سرمیدیان	۳
دکتر مهدی کریمی	۱
دکتر منوچهر گرجی	۳
دکتر محمد حسن مسیح آبادی	۱
دکتر فرهاد مشیری	۱
دکتر علی اکبر موسوی	۳
دکتر میرناصر نویدی	۲
دکتر شادمان ویسی	۱



ارزیابی تناسب اراضی و بررسی محدودیت‌ها برای کشت گیاهان صنعتی در مناطق

تحت کشت آبی کشور

میرناصر نویدی* و جواد سیدمحمدی

دانشیار پژوهش، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران؛

n.navidi@areeo.ac.ir

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

j.mohammadi@areeo.ac.ir

«مقاله پژوهشی»

دریافت: ۱۴۰۲/۴/۱۱ و پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۲

چکیده

در این پژوهش، واحدهای خاک در دشت‌های آبی کشور بر اساس داده‌های مطالعات قبلی خاک‌شناسی، تصاویر ماهواره‌ای، نقشه‌های کاربری و در نظر گرفتن پهنه‌های زراعی- اقلیمی، باهدف تعیین توان (پتانسیل) اراضی برای کشت آبی محصولات صنعتی شامل چغندر قند، پنبه، گلرنگ و نیشکر مشخص شد. سپس، اراضی موردنظر برای کشت آبی محصولات مزبور از نظر تناسب اراضی طبق چهارچوب فائو و روش پارامتریک ریشه دوم ارزیابی شد. نتایج نشان داد که از چهار میلیون هکتار اراضی مزبور برای کشت آبی چغندر قند، حدود ۱/۲۳ میلیون هکتار در کلاس S1 (مناسب زیاد)، ۱/۵ میلیون هکتار در کلاس S2 (مناسب متوسط)، ۷۴۰ هزار هکتار در کلاس S3 (مناسب بحرانی)، ۳۹۰ هزار هکتار در کلاس N1 (نامناسب در حال حاضر) و ۴۲۰ هزار هکتار در کلاس N2 (نامناسب دائمی) قرار داشت. از مجموع اراضی بررسی‌شده برای کشت پنبه به مساحت حدود ۲/۴ میلیون هکتار، ۷۵ هزار هکتار در کلاس S1، ۶۷۱ هزار هکتار در کلاس S2، ۸۹۵ هزار هکتار در کلاس S3، ۴۲۰ هزار هکتار در کلاس N1 و ۳۴۰ هزار هکتار در کلاس N2 بود. از ۲/۲ میلیون هکتار اراضی بررسی‌شده برای کشت گلرنگ، ۳۸ هزار هکتار در کلاس S1، ۵۶ هزار هکتار در کلاس S2، ۱/۳ میلیون هکتار در کلاس S3، ۳۶۳ هزار هکتار در کلاس N1 و ۳۹۸ هزار هکتار در کلاس N2، و از مجموع اراضی بررسی‌شده برای کشت نیشکر به مساحت حدود ۶۱۵ هزار هکتار، ۶ هزار هکتار در کلاس S1، ۱۸ هزار هکتار در کلاس S2، ۱۹۳ هزار هکتار در کلاس S3، ۹۸ هزار هکتار در کلاس N1 و ۳۰۰ هزار هکتار در کلاس N2 قرار داشت. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها نشان داد که تفکیک کلاس‌های تناسب اراضی دارای دقت قابل قبول است. مهم‌ترین ویژگی‌های محدودکننده خاک برای کشت چغندر قند عبارت‌اند از: اسیدیته، شوری و قلیائیت و زهکشی. ویژگی‌های محدودکننده برای کشت پنبه شامل عوامل اقلیمی، مقدار و درجه شیب، شوری و قلیائیت، آهک و گچ بود. نیز، اسیدیته، زهکشی، شوری و قلیائیت، و اقلیم جزو ویژگی‌های محدودکننده کشت گلرنگ بود و برای نیشکر، شوری و قلیائیت، زهکشی و شیب زمین. توجه به اراضی مناسب و نامناسب تفکیک‌شده در نقشه‌های تناسب اراضی محصولات ذکرشده در بالا، مدیریت کشت را برای کشاورزان و برنامه‌ریزان تسهیل می‌نماید.

کلمات کلیدی: کلاس‌های تناسب اراضی، اراضی مناسب گیاهان صنعتی، محدودیت‌های اراضی برای کشاورزی



مقدمه

خاک یکی از منابع طبیعی مهم برای تولید محصولات کشاورزی، امرار معاش و توسعه اجتماعی-اقتصادی جوامع است (ماندال و همکاران، ۲۰۲۰). خاک برخلاف آب که تا حدودی قابل برگشت است، تجدیدپذیر نیست. انسان امروزی برای پیشگیری از فقر و نابودی اراضی، بایستی همواره با طبیعت حرکت کرده، از اراضی به‌اندازه توان تولید و استعداد آن‌ها بهره‌برداری کند. افزون‌براین، بایستی انتخاب کاربری اراضی را بر اساس توان تولید خاک‌ها انجام داده و نیازهای اقتصادی و اجتماعی بشر را با توجه به توان اراضی برآورد نماید (سیدمحمدی و همکاران، ۲۰۱۹). کشت محصول بدون دانستن ظرفیت ذاتی و ویژه مکانی^۱ خاک‌ها و محدودیت‌های خاک منجر به کاهش قابل توجه در بهره‌وری و همچنین بدتر شدن سلامت خاک می‌شود (گاندھی و ساوالیا، ۲۰۱۴). کشت محصولات زراعی با در نظر گرفتن قابلیت‌های ویژه مکانی خاک ضمن بهینه کردن استفاده از این منابع، بازدهی نهایی را نیز به حداکثر می‌رساند (سیدمحمدی و نویدی، ۲۰۲۲). در تجزیه و تحلیل تناسب اراضی، بر روی برخی از خواص اساسی و پایدار خاک مانند بافت، پ‌هاش، کربن آلی، هدایت الکتریکی، و قلیائیت خاک تأکید بیشتری می‌شود؛ بنابراین، تجزیه و تحلیل تناسب خاک و ارزیابی اراضی برای محصولات مناسب با مناطق هدف به بهینه‌سازی بهره‌وری محصول کمک قابل توجهی می‌نماید (نویدی و همکاران، ۲۰۲۲).

شناسایی قابلیت اراضی و محدودیت‌ها و انتخاب کاربری مناسب، متناسب با ویژگی‌های خاک‌ها و اراضی از جمله راه‌های افزایش تولید در واحد سطح و یا به عبارت دیگر استفاده بهینه از اراضی است. برای دستیابی به این هدف، تعیین تناسب اراضی راه‌کار مناسبی است. تناسب اراضی، مناسب یا نامناسب بودن اراضی را برای انواع کاربری تعیین می‌کند. هدف از

مطالعات ارزیابی تناسب اراضی، استفاده بهینه و پایدار از اراضی با بررسی جنبه‌های فیزیکی، اجتماعی و اقتصادی اراضی است (نویدی و همکاران، ۲۰۲۳). گیاهان صنعتی معمولاً با محدوده وسیعی از شرایط اقلیمی و خاک سازگار بوده و در برابر تنش‌های محیطی تا حدود زیادی مقاوم و سرسخت می‌باشند (ساتهی‌یامورتی و همکاران، ۲۰۲۲). چندین محقق، تناسب اراضی را برای محصولات گیاهان صنعتی در سطح کشور ارزیابی کرده‌اند. سرمدیان و همکاران (۱۳۸۳)، حدود ۱۵ هزار هکتار از اراضی منطقه اشتیارد استان البرز را برای کشت پنبه ارزیابی کرده‌اند. آن‌ها مهم‌ترین عوامل محدودکننده رشد پنبه در این منطقه را ریز پستی و بلندی^۲، اقلیم و شوری و قلیائیت ذکر کرده‌اند. فرج‌نیا (۱۳۸۶)، اراضی دشت یکانات آذربایجان شرقی را به مساحت ۱۰ هزار هکتار برای کشت چغندر قند مورد بررسی قرار داده و عوامل محدودیت را شوری خاک، سنگریزه، بافت خاک سنگین و شیب اراضی بیان کرده است. شیري و فربودی (۱۳۹۳)، بخشی از اراضی منطقه طارم زنجان را بررسی کرده و ویژگی‌های عمق خاک، بافت و سنگریزه را عامل کاهش توان این اراضی برای کشت پنبه تشخیص داده‌اند. محمدی و همکاران (۱۳۸۶)، اراضی منطقه گنبد کابوس استان گلستان را برای کشت پنبه ارزیابی کرده و ویژگی‌های محدودکننده خاک در این منطقه را درجه حرارت، شوری و قلیائیت، پ‌هاش و زهکشی تعیین کرده‌اند. منتخبی کلجاهی و همکاران (۱۳۹۲)، اراضی ایستگاه تحقیقات گرگج دانشگاه تبریز را برای کشت چغندر قند و گلرنگ ارزیابی کرده و به دلیل محدودیت‌های قابل ملاحظه ویژگی‌های خاک، کشت این محصولات را توصیه نکرده‌اند. ظهیرنیا و متین فر (۱۳۹۸)، بخشی از اراضی استان خوزستان را برای کشت نیشکر بررسی کرده‌اند و در قسمت‌های نامناسب ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی را عامل محدودیت بیان کرده‌اند. مرادی شرف (۱۳۹۲)، بخش‌هایی از شرق استان گیلان را برای کشت بادام زمینی مورد مطالعه قرار داده و ویژگی‌های اقلیمی و

^۲ Microrelife^۱ Site specific

عوامل زهکشی را دلیل اصلی کاهش درجه تناسب اراضی در برخی از واحدها ذکر کرده است.

گیاهان صنعتی گیاهانی هستند که از آن‌ها در صنایع مختلف استفاده می‌شود. معمولاً از ترکیبات و تولیدات این گیاهان به عنوان ماده خام در بخش‌های مختلف صنعت بهره‌برداری می‌گردد. استفاده صنعتی از این گیاهان در زمینه‌های مختلف رواج دارد. این گیاهان فرآورده‌هایی همچون محصولات نشاسته‌ای، محصولات قندی، محصولات روغنی، محصولات اسانس‌دار، محصولات رنگی و محصولات نساجی را تولید می‌کنند که مصارف صنعتی دارند. برای این منظور، بخشی از اراضی کشاورزی در دشت‌های آبی کشور با روش پارامتریک ریشه دوم برای کشت آبی گیاهان صنعتی شامل چغندر قند، نیشکر، پنبه و گلرنگ مورد ارزیابی تناسب اراضی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی، اراضی واقع شده در دشت‌های آبی کشور را شامل است. اقلیم محدوده مطالعاتی شامل پهنه‌های مختلف اقلیمی از گرم و خشک تا سرد و مرطوب را در برمی‌گیرد.

مراحل پژوهش

به منظور تعیین تناسب اراضی برای کشت گیاهان صنعتی شامل چغندر قند، نیشکر، پنبه و گلرنگ در دشت‌های آبی کشور، فرآیند تجمیع، آماده‌سازی، رقوم سازی مطالعات خاک‌شناسی و محاسبه مقادیر شاخص اراضی و تعیین کلاس‌های تناسب در واحدهای خاک طی مراحل زیر انجام شد:

جمع‌آوری مستندات: گزارش‌های مطالعات خاک‌شناسی انجام شده در سطح کشور جمع‌آوری شده، سپس مشخصات کلی مطالعات مانند سال انجام، دقت مطالعه، مقیاس نقشه‌ها، نوع نقشه‌های تفسیری، مساحت مطالعه، سامانه

طبقه‌بندی خاک و همچنین کیفیت نقشه‌ها از نظر مرجع مکانی (داشتن مختصات جغرافیایی) و سایر موارد تعیین شدند و به عنوان فراداده^۱ مورد استفاده قرار گرفتند. در هر مطالعه، کیفیت و کمیت محتویات گزارش مطالعات از جمله وجود اطلاعات پایه مورد نیاز طرح تناسب اراضی شامل مشخصات ریخت‌شناسی^۲ و جدول تجزیه‌های آزمایشگاهی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی افق‌های خاک سری‌های شاهد بررسی و قابلیت به کارگیری آن‌ها در فرآیند ارزیابی تناسب اراضی مورد بررسی دقیق قرار گرفت.

رقومی سازی اطلاعات و پردازش داده‌ها: نقشه‌های خاک

کاغذی و پستی و بلندی^۳ اسکن شده و سپس زمین مرجع گردید. یکپارچه‌سازی لایه‌های واحدهای خاک و اندکس نقشه‌های پستی و بلندی برای هر منطقه مطالعاتی انجام شد و در نهایت، عملیات هم‌پوشانی کناره‌ای، پالایش و آماده‌سازی نقشه‌ها برای پردازش در محیط نرم‌افزار آرک/جی‌ای‌اس صورت پذیرفت. داده‌های توصیفی شامل ویژگی‌های ریخت‌شناسی خاک‌ها و نتایج مشاهدات میدانی و تجزیه‌های آزمایشگاهی خاک رخ‌های شاهد مانند بافت، ساختمان، سنگ‌ریزه، عمق خاک، آهک، گچ، شوری و قلیائیت و شیب اراضی در محیط نرم‌افزارهای متنی ذخیره و ثبت شد. سپس این داده‌ها به داده‌های مکانی مرتبط خود در محیط جی‌ای‌اس ملحق شدند. بدین ترتیب پایگاه داده خاک تهیه شد. به هر یک از واحدهای نقشه نیز بر اساس استان، شماره گزارش، واحد خاک و شماره خاک‌رخ شاهد یک کد اختصاصی تعلق گرفت، به گونه‌ای که بتواند با نتایج تناسب اراضی مرتبط شوند (جمشیدی، ۱۳۹۸).

کنترل کیفی مطالعات رقوم‌ی شده: به منظور کنترل کیفی

مطالعات، مرزهای نقشه توسط تصاویر گوگل‌ارث صحت‌سنجی شد و اصلاحات مورد نیاز صورت پذیرفت. همچنین منابع خطا، مانند خطاهای فنی^۴ و شخصی در فرآیند رقوم سازی مورد بررسی قرار گرفت. خطاهای فنی

^۲ Topography

^۳ Thecnical errors

^۱ Meta data

^۲ Morphology

مربوط به خطای عکس‌های هوایی به‌عنوان لایهٔ مبنایی مطالعات خاک‌شناسی (موزائیک عکس‌های هوایی) است. این نوع خطا به دلیل تفاوت مقیاس در قسمت‌های مختلف عکس هوایی بوده و بنابراین وجود خطا در مرزهای واحدهای منفک شده نقشهٔ خاک دور از انتظار نیست. خطای شخصی نیز شامل خطای خاک‌شناس در ترسیم مرز خاک‌ها بر روی نقشهٔ مبنایی و همچنین نقشهٔ نهایی است که پس از مرحلهٔ مطالعات میدانی انجام می‌شود. همچنین خطای رقوم‌ساز شامل خطا در مراحل مختلف رقوم‌سازی از مرحلهٔ کپی نقشه‌های اصلی، خطای زمین مرجع و خطای ترسیم مرزهای واحدهای نقشهٔ خاک است؛ بنابراین با کاهش منابع خطا، نقشه‌های تهیه‌شده دارای دقت و صحت مناسبی شدند.

تهیهٔ لایهٔ اراضی هدف و اجرای فرآیند تناسب اراضی:

پس از تهیهٔ لایهٔ اراضی تحت کشت آبی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لند ست ۲۰۱۴، تصاویر ماهوارهٔ مودیس ۲۰۱۵، نقشهٔ کاربری اراضی تهیه‌شده توسط مؤسسهٔ پژوهش‌های برنامه‌ریزی و اقتصادی وزارت جهاد کشاورزی با عنوان سیمای آبخیزها در سال ۱۳۸۲ با مقیاس ۱:۲۵۰,۰۰۰ و لایهٔ پوششی کشوری کاربری اراضی با مقیاس ۱:۲۵۰,۰۰۰ توسط سازمان نقشه‌برداری کشور، این لایه در محیط نرم‌افزار جی‌ای‌اس فراخوانده شد و لایهٔ محدودهٔ مطالعات خاک‌شناسی نیز به محیط اضافه گردید و نقشه‌های خطی^۱ آن تهیه شد. سپس با هم‌پوشانی لایهٔ محدودهٔ اراضی کشاورزی آبی و لایهٔ محدوده‌های رقوم‌شده مطالعات خاک‌شناسی، لایهٔ واحدهای خاک برای ارزیابی تناسب اراضی مشخص شد. از نظر شرایط اقلیمی بررسی اطلاعات موجود نشان داد که اغلب نقشه‌های تهیه‌شده در مقیاس ملکی به دلیل کم بودن تعداد ایستگاه‌های هواشناسی در سطح کشور و توزیع نامناسب ارتفاعی و مکانی ایستگاه‌های هواشناسی همراه با استفاده از داده‌های محیطی نادقیق و به‌کارگیری مدل‌های ریاضی

ناکارآمد برای تهیهٔ آن‌ها معمولاً بر پستی‌وبلندی‌ها و پیچیدگی‌های اقلیمی-اراضی کشور منطبق نیستند؛ بنابراین نتوانستند زیربنای مناسبی برای انجام این مطالعه باشند. لذا نقشهٔ پهنه‌بندی نواحی زراعی-اقلیمی یونسکو^۲ (ای سی زد) به دلیل برخی مزیت‌ها مانند تبعیت واحدهای ترسیمی آن از روند تغییرات مکانی پستی‌وبلندی ایران (۱:۵۰۰۰۰)، استفاده از متغیرهای اقلیمی و محیطی بیشتر در مدل‌سازی، در نظر گرفتن تغییرات ارتفاعی نقطه‌ای و پیوسته و تطابق افزون‌تر کلاس‌های تعریف‌شده با اقلیم مناطق مختلف، مبنای کلاس‌های اقلیمی قرار گرفت. پس از هم‌پوشانی لایهٔ خاک با نقشهٔ ای سی زد، مشخص شد که برای هر یک از واحدهای خاک و ایستگاه هواشناسی مربوطه‌اش اعم از اقلیم‌شناسی و یا هواشناسی کشاورزی کدام پهنهٔ ای سی زد باید استفاده شود. با بررسی نقشه‌های منطقه‌ای و ملکی وضعیت اقلیمی ایران به کمک سازمان هواشناسی کل کشور در قالب نقشهٔ خرد اقلیم‌های کشور به‌روزرسانی شد و در این مطالعه از نتایج حاصله استفاده شد. همچنین زمان‌بندی مراحل دورهٔ رشد و نمو گیاهان^۳ چغندرقد، نیشکر، پنبه و گلرنگ در نقاط مورد مطالعه با همکاری کارشناسان مراکز تحقیقات و سازمان‌های جهاد کشاورزی با نهایت دقت و حساسیت بر مبنای پهنه‌های ای سی زد تهیه شد. با انجام فرآیندهای ذکرشده، واحدهای خاک در دشت‌های آبی کشور مرزبندی گردید. برای تعیین شاخص اراضی در واحدهای خاک، ویژگی‌های آب و هوایی شامل گروه‌های اقلیمی، درجهٔ حرارت، رطوبت نسبی و مقدار تابش خورشید، ویژگی‌های خاک و زمین‌نما برای کشت آبی چغندرقد، پنبه، گلرنگ و نیشکر بر اساس چهارچوب فائو (۱۹۷۶) با روش پارامتریک ریشهٔ دوم از طریق رابطهٔ ۴ با استفاده از نرم‌افزار ارزیابی تناسب اراضی تهیه‌شده در مؤسسهٔ تحقیقات خاک و آب و با توجه به جدول‌های نیازهای اقلیم، خاک و زمین‌نمای محصولات ذکرشده (سیدجلالی و همکاران، ۱۳۹۸) مورد ارزیابی قرار گرفت.

^۲Phenologic period

^۱ Vector

^۲Agro-Climatic Zones (ACZ)

لازم به توضیح است برای تعیین درجه اقلیمی ابتدا محدودکننده‌ترین ویژگی‌های اقلیمی در هر گروه اقلیمی مشخص و سپس بر اساس رابطه ریشه دوم شاخص اقلیمی تعیین گردید. با استفاده از رابطه‌های ۲ و ۳ مقدار شاخص به‌دست‌آمده به درجه اقلیمی تبدیل شد تا همراه با سایر ویژگی‌ها شامل خاک و پستی‌وبلندی در تعیین شاخص تناسب اراضی مورد استفاده قرار بگیرد. پس از انجام محاسبات ارزیابی تناسب اراضی، کلاس تناسب اراضی در واحدهای نقشه تعیین شد (جدول ۱).

CI ، شاخص اقلیم، R_{min} ، کمترین درجه در بین گروه‌های اقلیمی، A و B ... کمترین درجه مربوط به هر گروه اقلیمی و CR ، درجه نهایی اقلیم است. اگر مقدار شاخص اقلیم کمتر از ۲۵ باشد درجه اقلیمی از رابطه ۲ و اگر مقدار آن افزون‌تر از ۹۲/۵ باشد در این صورت درجه اقلیمی ۱۰۰ است که این به معنی عدم وجود محدودیت اقلیمی است. اگر مقدار شاخص اقلیمی افزون‌تر از ۲۵ و کمتر از ۹۲/۵ باشد در این صورت مقدار درجه اقلیمی از رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$LSI = R_{min} \sqrt{\frac{A}{100} \times \frac{B}{100} \times \dots} \quad (4)$$

LSI ، شاخص تناسب اراضی، R_{min} ، ویژگی است که دارای کمترین درجه است، A و B ... درجات مربوط به سایر ویژگی‌های موردبررسی شامل اقلیم، خاک و توپوگرافی هستند.

$$CI = R_{min} \sqrt{\frac{A}{100} \times \frac{B}{100} \times \dots} \quad (1)$$

$$CR = 1.6CI \quad (2)$$

$$CR = 16.67 + 0.9CI \quad (3)$$

جدول ۱- کلاس‌های تناسب اراضی و مقدار شاخص اراضی مرتبط

مقدار شاخص	علامت کلاس	کلاس تناسب اراضی
۷۵-۱۰۰	S1	تناسب زیاد
۵۰-۷۵	S2	نسبتاً مناسب
۲۵-۵۰	S3	تناسب کم
۱۲/۵-۲۵	N1	نامناسب در حال حاضر
۰-۱۲/۵	N2	نامناسب دائمی

نتایج و بحث

تناسب اراضی و عوامل محدودکننده

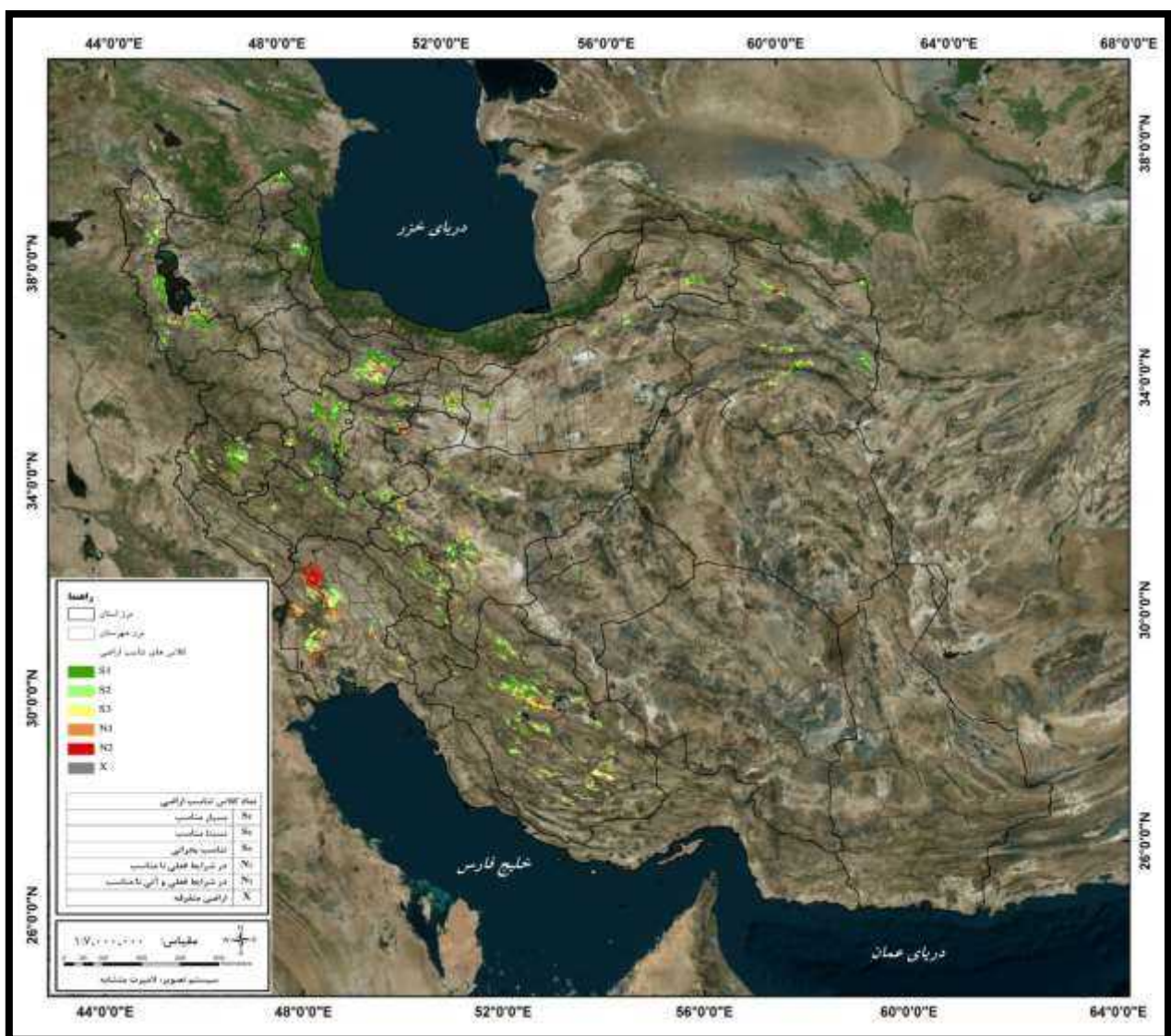
چغندرقد

برای ارزیابی تناسب اراضی به‌منظور کشت چغندرقد آبی در اراضی کشاورزی کشور تعداد ۸۰۶۹ واحد ترسیمی به مساحت چهار میلیون هکتار از دشت‌های آبی کشور با محدودیت‌هایی شامل شیب، زهکشی، بافت، عمق خاک و مقدار سنگ‌ریزه، آهک، گچ، پ‌هاش، EC ، ESP و اقلیم انتخاب شدند. مقادیر مشخصه‌های ذکر شده

با اعمال ضرایب وزنی عمق استخراج‌شده و با استفاده از جدول‌های نیازهای گیاهان (اقلیم، خاک و زمین‌نما) به درجه تبدیل شدند، سپس شاخص تناسب اراضی در همه واحدهای خاک موردبررسی قرارگرفته و محاسبه گردید. نهایتاً کلاس تناسب اراضی در واحدهای نقشه تعیین شد. گسترش جغرافیایی پراکنش کلاس‌های تناسب اراضی برای کشت آبی چغندرقد در دشت‌های آبی کشور در (شکل ۱) ارائه شده است. نتایج نشان داد که حدود ۱/۲۳ میلیون هکتار از اراضی موردبررسی در سطح کشور در کلاس تناسب

حاصلخیزی می‌باشند. اراضی کلاس S3 بیشتر توسط ویژگی‌های فیزیکی، شوری یا قلیائیت، زهکشی، شیب و حاصلخیزی محدود شده‌اند. اراضی بررسی شده در کلاس نامناسب با محدودیت‌های خیلی شدید شوری و سدیمی بودن و ویژگی‌های نامناسب فیزیکی، حاصلخیزی، شیب و زهکشی در خاک مواجه هستند.

زیاد (S1)، ۱/۵ میلیون هکتار از اراضی تحت کشت آبی در کلاس نسبتاً مناسب (S2)، ۷۴۰ هزار هکتار در کلاس تناسب کم یا بحرانی (S3)، ۳۹۰ هزار هکتار در کلاس نامناسب در حال حاضر (N1) و ۴۲۰ هزار هکتار در کلاس نامناسب دائمی (N2) قرار دارند. اراضی واقع شده در کلاس S2 عمدتاً دارای محدودیت‌های زهکشی، شیب، شوری و قلیائیت و ویژگی‌های نامناسب فیزیکی و



شکل ۱- نقشه گسترش کلاس‌های تناسب اراضی برای کشت آبی چغندر قند

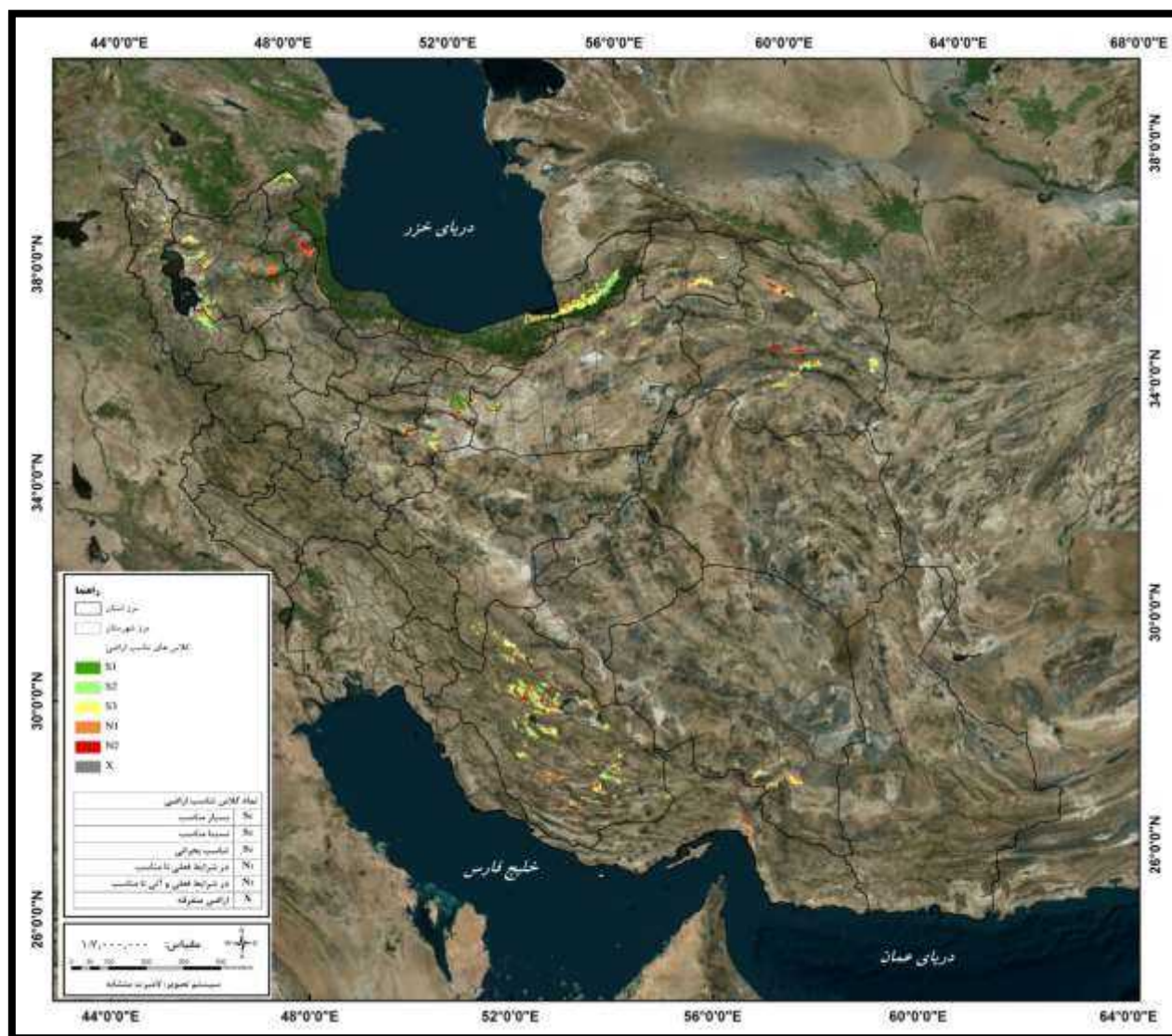
پهش، هدایت الکتریکی، درصد سدیم تبادلی و اقلیم به مساحت ۲/۴ میلیون هکتار برای بررسی تناسب اراضی کشت محصول پنبه انتخاب شدند. گسترش جغرافیایی کلاس‌های تناسب اراضی برای کشت آبی این محصول در

پنبه

در مجموع ۴۵۵۸ واحد ترسیمی خاک از اراضی دشت‌های آبی کشور با محدودیت‌های شیب، زهکشی، بافت خاک، عمق خاک، مقدار سنگ‌ریزه، آهک، گچ،

محدودیت‌های زیاد برای کشت این گیاه شامل ویژگی‌های فیزیکی و حاصلخیزی، اقلیم، شوری یا قلیائیت، زهکشی و توپوگرافی همراه هستند. حدود ۷۶۰ هزار هکتار از اراضی بررسی شده در کلاس‌های نامناسب N1 و N2 قرار داشته و دارای محدودیت‌های خیلی زیاد عمدتاً شوری و سدیمی بودن، پ‌هاش، آهک، گچ، شیب و زهکشی می‌باشند.

شکل ۲ ارائه شده است. بر اساس نتایج حاصله ۷۵ هزار هکتار از اراضی موردبررسی در کلاس تناسب S1 و بدون محدودیت قرار دارند. حدود ۶۷۱ هزار هکتار در کلاس S2 با محدودیت‌های اقلیم، ویژگی‌های فیزیکی، حاصلخیزی، زهکشی، توپوگرافی، شوری و قلیائیت هستند. اراضی کلاس S3 به مساحت ۸۹۵ هزار هکتار با



شکل ۲- نقشه گسترش کلاس‌های تناسب اراضی برای کشت آبی پنبه

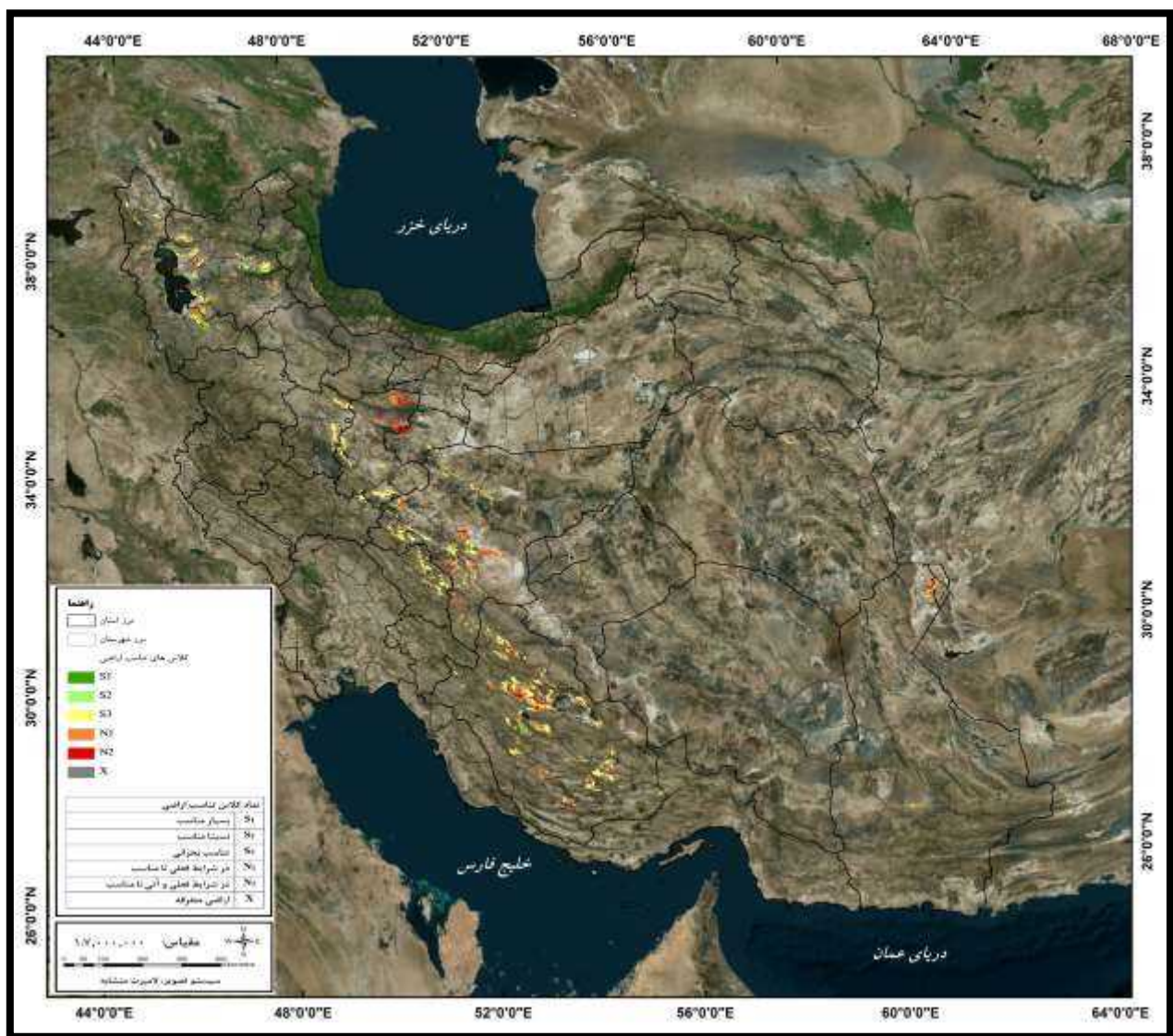
محدودیت‌های اقلیم، شیب، زهکشی، بافت خاک عمق خاک، مقدار سنگ‌ریزه، آهک، گچ، پ‌هاش، هدایت الکتریکی و درصد سدیم تبدلی مختلف انتخاب شدند. گسترش جغرافیایی تناسب واحدهای نقشه تناسب اراضی

گلرنگ

برای ارزیابی تناسب اراضی به منظور کشت آبی گیاه گلرنگ مجموعاً تعداد ۴۹۸۰ واحد ترسیمی به وسعت ۲/۲ میلیون هکتار در دشت‌های آبی کشور با

فیزیکی، شوری یا قلیائیت، زهکشی، پستی و بلندی، اقلیم و حاصلخیزی است. حدود ۳۶۳ هزار هکتار در کلاس نامناسب در حال حاضر (N1) و حدود ۳۹۸ هزار هکتار در کلاس نامناسب (N2) برای کشت آبی گلرنگ قرار گرفته که دارای محدودیت‌های خیلی زیاد عمدتاً ناشی از شوری و سدیمی بودن، ویژگی‌های فیزیکی و حاصلخیزی، شیب و زهکشی هستند.

در شکل ۳ ارائه شده است. نتایج نشان داد که از مجموع اراضی مورد بررسی ۳۸ هزار هکتار در کلاس تناسب S1 و در اراضی بدون محدودیت قرار گرفته‌اند. حدود ۵۶ هزار هکتار در کلاس S2 قرار دارند که با محدودیت‌های حاصلخیزی، زهکشی، اقلیم، شیب و ویژگی‌های فیزیکی همراه می‌باشند. اراضی کلاس S3 به مساحت ۱/۳ میلیون هکتار با محدودیت‌های زیاد برای کشت این گیاه هستند که محدودیت‌های آن‌ها شامل محدودیت‌های ویژگی‌های

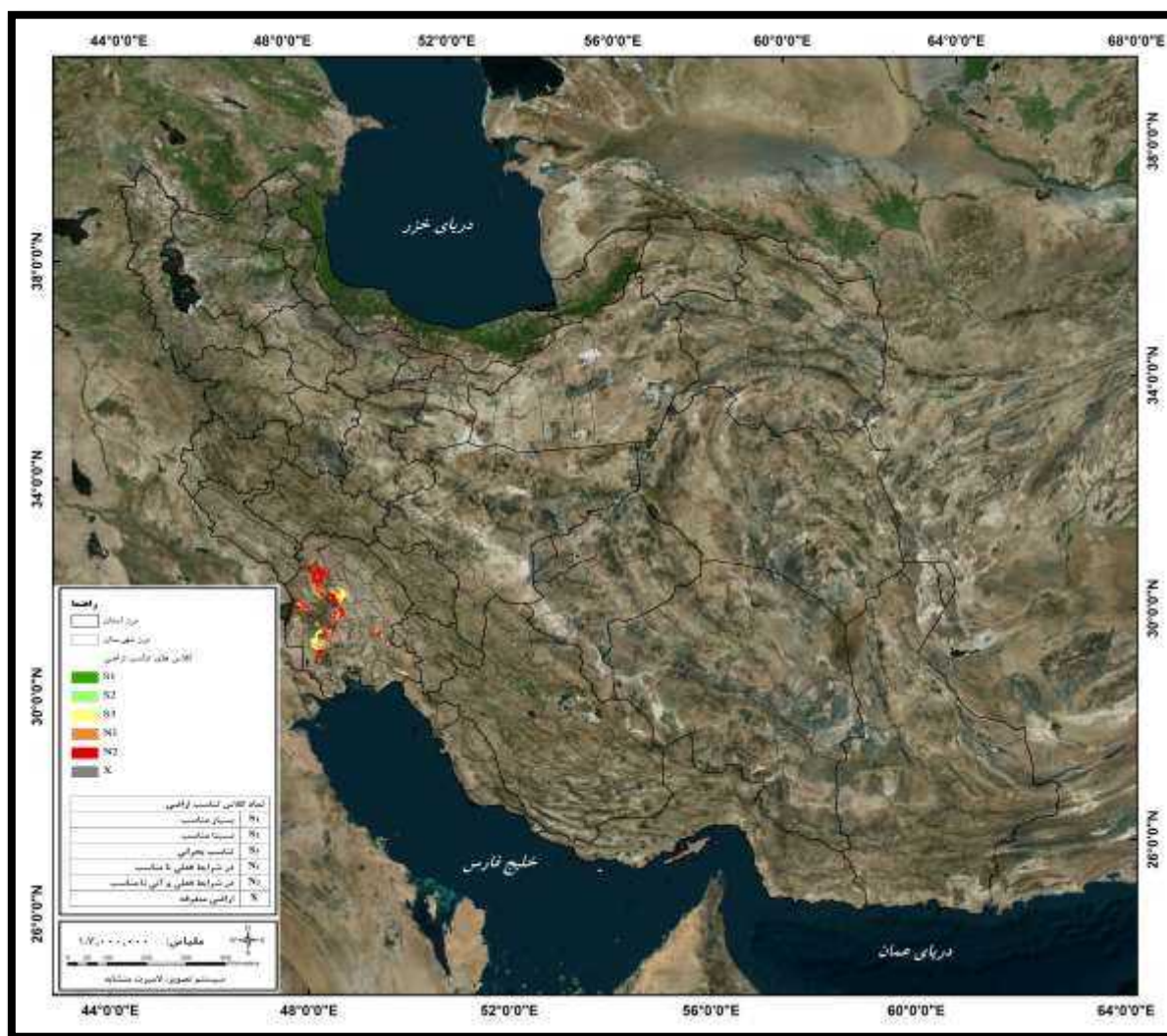


شکل ۳- نقشه گسترش کلاس‌های تناسب اراضی برای کشت آبی گلرنگ

نیشکر

برای ارزیابی تناسب اراضی به منظور کشت آبی گیاه نیشکر مجموعاً تعداد ۹۲۵ واحد ترسیمی نقشه خاک به وسعت ۶۱۵ هزار هکتار در دشت‌های آبی کشور با محدودیت‌های ویژگی‌های اقلیمی، شیب، زهکشی، بافت خاک، عمق خاک و مقدار سنگریزه، آهک، گچ، پ‌هاش، هدایت الکتریکی و درصد سدیم تبدلی مختلف انتخاب شدند. شاخص تناسب اراضی برای کلیه واحدهای خاک موردبررسی، محاسبه و کلاس تناسب آن‌ها تعیین گردید. در شکل ۴ گسترش جغرافیایی اراضی با کلاس‌های تناسب مختلف برای کشت آبی نیشکر ارائه شده است. به دلیل کشت گسترده در استان خوزستان این گیاه فقط در این استان بررسی شد. شاخص اقلیمی برای کشت نیشکر در اراضی بهبهان، دزفول، ایذه، رامهرمز و شوشتر از ۷۸ تا ۹۲ متغیر بود. اراضی واقع در این مناطق بدون هیچ‌گونه محدودیت اقلیمی در کلاس S1 قرار داشتند. تناسب اقلیمی نیشکر در مناطق آبادان و اهواز با شاخص اقلیمی در حدود ۶۴ به دلیل داشتن محدودیت دمای متوسط روزانه در مرحله جوانه‌زنی در کلاس تناسب S2 قرار گرفتند. نتایج ارزیابی تناسب اراضی برای کشت نیشکر نشان داد که از

مجموع اراضی بررسی شده حدود ۶ هزار هکتار بدون محدودیت بوده و در کلاس تناسب S1 قرار دارند. حدود ۱۸ هزار هکتار از اراضی بررسی شده در کلاس نسبتاً مناسب (S2) قرار داشت و دارای محدودیت‌های نسبتاً زیاد از نظر مقدار شوری و قلیائیت خاک، زهکشی و شیب هستند. اراضی با کلاس تناسب S3 دارای محدودیت‌های زیاد مربوط به ویژگی‌های حاصلخیزی خاک است که در مجموع ۱۹۳ هزار هکتار از کل اراضی بررسی شده را شامل می‌شود. اراضی کلاس‌های N1 و N2 (بدون تناسب) به ترتیب با مساحت ۹۸ و ۳۰۱ هزار هکتار، دارای محدودیت‌های خیلی زیاد مربوط به مقدار شوری و قلیائیت خاک‌ها، ویژگی‌های نامناسب فیزیکی و پ‌هاش، زهکشی و شیب می‌باشند. بر اساس نقشه پراکنش جغرافیایی کلاس‌های تناسب اراضی برای کشت نیشکر (شکل ۴) کلیه اراضی دارای کلاس مناسب و نسبتاً مناسب در مناطق ایذه و اندیمشک گسترش دارند. اراضی با کلاس تناسب کم عمدتاً در مناطق شوشتر، اهواز و بخش‌هایی از شادگان و خرمشهر واقع شده‌اند. اراضی نامناسب در مناطق دزفول، شوش، شوشتر، دشت آزادگان، باوی، کارون، خرمشهر و رامهرمز قرار گرفته‌اند.



شکل ۴- نقشه گسترش کلاس‌های تناسب اراضی برای کشت آبی نیشکر

تجزیه و تحلیل آماری نتایج

برای بررسی دقت تفکیک کلاس‌های تناسب اراضی و اثرات ویژگی‌ها روی کلاس‌های تناسب، تجزیه واریانس چندمتغیره^۱ بین کلاس‌های تناسب اراضی در هر یک از واحدهای خاک مورد مطالعه به تفکیک محصولات با توجه به ویژگی‌های خاک، زمین‌نما و اقلیم به صورت جداگانه انجام شد. این شیوه توسط محققان زیادی برای بررسی دقت تفکیک کلاس‌های حاصلخیزی در نقشه حاصلخیزی خاک (دواتگر و همکاران، ۲۰۱۲؛ بیهر و

همکاران، ۲۰۱۵؛ تریپاتی و همکاران، ۲۰۱۸)، دقت تفکیک واحدهای نقشه خاک (اسفندیار بروجنی و همکاران، ۲۰۱۰) و دقت تفکیک کلاس‌های تناسب اراضی (سیدمحمدی و همکاران، ۲۰۱۹؛ سیدمحمدی و همکاران، ۱۴۰۱؛ نویدی و همکاران، ۱۴۰۱) استفاده شده است. نتایج تجزیه واریانس چندمتغیره با توجه به آزمون لامبدای ویلکس^۲ در سطح احتمال ۹۵ درصد مشخص کرد که بین کلاس‌های تناسب اراضی با $P \text{ value} < 0.0001$ برای همه محصولات اختلاف معنی‌دار وجود دارد و تفکیک کلاس‌های تناسب به درستی انجام شده است (جدول ۲).

²Wilks' lambda

¹Multivariate analysis of variance (MANOVA)

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس چند متغیره با آزمون لامبدای ویلکس بین کلاس‌های تناسب اراضی ($\alpha=0/05$)

محصول	ارزش	F	درجه آزادی فرض	درجه آزادی خطا	P value
چغندر قند	۰/۱۸۴	۴۰۹/۷	۳۶	۲۷۵۶۸	<۰/۰۰۰۱
پنبه	۰/۳۷۲	۱۳۱/۵	۳۶	۱۵۶۷۷	<۰/۰۰۰۱
گلرنگ	۰/۴۴۲	۱۲۵/۲	۳۶	۱۸۴۸۸	<۰/۰۰۰۱
نیشکر	۰/۳۷	۲۸/۶	۳۶	۳۳۸۵	<۰/۰۰۰۱

برای تعیین مهم‌ترین ویژگی‌های مؤثر در تفکیک کلاس‌های تناسب اراضی مقایسه میانگین مقادیر ویژگی‌ها بین کلاس‌های تناسب با استفاده از آزمون کمترین تفاوت معنی‌دار^۱ در سطح احتمال ۹۵ درصد انجام شد (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که میان ویژگی‌های موردبررسی شیب، شوری و قلیائیت، بافت و زهکشی، بین همه کلاس‌های تناسب اراضی، برای کشت آبی چغندر قند اختلاف معنی‌دار وجود دارد. در مورد گیاه پنبه بافت خاک، آهک و ویژگی‌های اقلیمی افزون‌ترین تأثیر را در تفکیک

کلاس‌های تناسب اراضی داشته‌اند. مؤثرترین ویژگی در تفکیک کلاس‌های تناسب برای کشت گیاه گلرنگ بر اساس مقایسه میانگین ویژگی آهک خاک است. با توجه به (جدول ۳) مشاهده می‌شود که مقادیر ویژگی‌های دارای اثر منفی در رشد و توسعه محصولات موردبررسی شامل سیل‌گیری، زهکشی، بافت، ساختمان، عمق خاک و درصد سنگ‌ریزه، آهک، گچ، پ‌هاش، شوری و قلیائیت خاک از کلاس S1 تا N2 افزایش داشته و مقدار درجه‌شان کاهش یافته است.

جدول ۳- مقایسه میانگین مقادیر و درجه ویژگی‌های اراضی در کلاس‌های تناسب اراضی با آزمون ال اس دی ($\alpha=0/05$)^{*}

محصول	کلاس	شیب (%)	سیل گیری	زهکشی	بافت	آهک	گچ	pH	EC (dSm ⁻¹)	ESP (%)	اقلیم
چغندر قند	S1	۱/۰۱ ^e	۹۷/۵ ^a	۹۶ ^a	۹۵ ^a	۲۱/۹ ^d	۰/۳۵ ^d	۷/۷۸ ^{bc}	۱/۶ ^d	۲/۳ ^{cd}	-
	S2	۲ ^d	۹۵/۶ ^a	۹۴ ^b	۸۷ ^b	۳۰ ^c	۰/۹۶ ^c	۷/۷۶ ^c	۲ ^d	۲/۹ ^d	-
	S3	۲/۳۶ ^c	۹۱/۹ ^b	۹۱ ^c	۷۷ ^c	۳۱ ^b	۱/۱۴ ^c	۷/۷۹ ^b	۳/۹ ^c	۵/۳ ^c	-
	N1	۲/۸۹ ^b	۸۵/۳ ^c	۸۸ ^d	۶۹ ^d	۳۳/۲ ^a	۲/۹ ^b	۷/۸ ^b	۲۲/۶ ^b	۲۶/۵ ^b	-
	N2	۳/۹۷ ^a	۷۹/۷ ^d	۸۳ ^e	۶۳ ^e	۳۴/۳ ^a	۶/۹ ^a	۸ ^a	۲۸ ^a	۳۷ ^a	-
پنبه	S1	۱ ^d	-	۹۷/۵ ^a	۹۶/۶ ^a	۱۳ ^d	۰ ^c	۷/۵ ^b	۲/۶ ^d	۳/۳ ^{cd}	۸۳/۵ ^a
	S2	۱/۳ ^d	-	۹۶ ^a	۹۳ ^a	۲۲ ^c	۰/۲۶ ^c	۷/۶ ^b	۳/۴ ^d	۳/۶ ^d	۷۷ ^b
	S3	۳ ^c	-	۹۳ ^b	۷۹ ^b	۲۳ ^c	۰/۴۶ ^{bc}	۷/۸ ^a	۵/۴ ^c	۵/۹ ^c	۷۵ ^c
	N1	۲/۷۴ ^b	-	۹۱ ^c	۷۱ ^c	۲۶ ^b	۰/۸۵ ^b	۷/۸۵ ^a	۱۲/۵ ^b	۱۲/۹ ^b	۶۹ ^d
	N2	۳/۷۵ ^a	-	۸۸ ^d	۶۹ ^d	۳۲ ^a	۲/۴۲ ^a	۷/۹ ^a	۱۵/۷ ^a	۱۵/۹ ^a	۶۴ ^e
گلرنگ	S1	۱ ^d	-	۹۵/۷ ^a	۹۵/۵ ^a	۰/۹۳ ^e	۰/۲۵ ^c	۶/۲۴ ^d	۰/۷۸ ^c	۰ ^d	۸۹/۵ ^a
	S2	۱/۷ ^c	-	۹۴ ^{ab}	۹۳ ^a	۱۲/۶ ^d	۰/۳۴ ^c	۷/۲۵ ^c	۱/۱۳ ^c	۰/۷۲ ^d	۸۴/۷ ^b
	S3	۳ ^c	-	۹۳ ^b	۸۴ ^b	۲۶/۸ ^c	۰/۵۴ ^c	۷/۸ ^b	۱/۸۱ ^c	۴/۵ ^c	۸۴ ^b
	N1	۲/۸۵ ^b	-	۹۱ ^c	۷۱ ^c	۳۱/۹ ^b	۱/۳ ^b	۷/۸ ^b	۱۱/۳ ^b	۱۲/۴ ^b	۸۱ ^c
	N2	۴/۲ ^a	-	۸۶ ^d	۶۵ ^d	۳۴/۵ ^a	۲/۵۴ ^a	۷/۹ ^a	۱۴/۵ ^a	۱۵/۴ ^a	۸۱ ^c
نیشکر	S1	۱ ^d	-	۹۶/۴ ^{ab}	۹۳ ^a	۲۱/۳ ^d	۰/۰۰۶ ^b	۷/۴۹ ^{ab}	۰/۳۵ ^d	۱/۸ ^d	۹۶/۴ ^a
	S2	۲/۳ ^c	-	۹۵ ^a	۸۹/۶ ^a	۲۹/۳ ^c	۰/۰۳ ^b	۷/۷۳ ^a	۱/۴۳ ^c	۲/۵ ^d	۹۵/۵ ^a
	S3	۲/۲۵ ^c	-	۸۹/۶ ^{ab}	۸۷ ^a	۳۲/۷ ^b	۰/۵ ^b	۷/۶۸ ^a	۱/۴۳ ^c	۴/۹ ^c	۸۷ ^b
	N1	۳/۴۳ ^b	-	۸۶/۴ ^{bc}	۷۶ ^b	۴۴/۷ ^a	۰/۸ ^b	۷/۶۴ ^a	۸/۰۵ ^b	۱۰/۵ ^b	۸۳ ^c
	N2	۳/۹۳ ^a	-	۸۳/۵ ^c	۷۴ ^b	۴۴/۶ ^a	۱۳/۳ ^a	۶/۶۴ ^b	۲۸/۶ ^a	۲۰/۷ ^a	۸۱ ^c

^{*} برای ویژگی‌های زهکشی، سیل‌گیری، بافت و اقلیم از مقادیر درجات استفاده شده است.

تحلیل ویژگی‌های اراضی در ارتباط با عملکرد گیاهان صنعتی موردبررسی در استان‌های شاخص

بر اساس سطح زیر کشت و عملکرد آبی محصولات، ویژگی‌های خاک در برخی استان‌ها موردبررسی قرار گرفت. استان آذربایجان غربی دارای بیشترین سطح زیرکشت چغندر قند با وسعت حدود ۲۶ هزار هکتار و حدود ۱/۵ میلیون تن تولید است (بی‌نام، ۱۴۰۱). عمده‌ترین ویژگی‌های محدودکننده اراضی در کلاس‌های تناسب S2 و S3 شامل مقدار شیب و در برخی واحدها قلیائیت است. هم‌چنین بررسی کلاس‌های تناسب N1 و N2 برای کشت آبی چغندر قند مشخص کرد که مهم‌ترین عوامل محدودکننده پهاش و شوری و قلیائیت خاک است. بررسی واحدهای خاک با محدودیت پهاش نشان داد که خاک این واحدها دارای مقدار قلیائیت افزون‌تر است که دلیل افزایش مقدار پهاش در این خاک‌ها بوده و باعث نامناسب شدن این خاک‌ها برای کشت آبی چغندر قند شده است. اثر آب‌کافت از طریق یون‌های سدیم از دلایل زیاد بودن پهاش خاک در این کلاس‌ها است (اسپوزیتو، ۲۰۱۶). در استان خراسان رضوی که پس از آذربایجان غربی افزون‌ترین وسعت و مقدار تولید چغندر قند را دارد، ۲۰ هزار هکتار و ۹۰۰ تن، محدودیت‌ها عمدتاً ناشی از پهاش و بافت خاک در کلاس‌های S2 و S3، شوری و قلیائیت و پهاش در کلاس‌های N1 و N2 است. در خاک‌های خراسان رضوی دلیل افزایش پهاش خاک بیشتر به قلیائیت خاک ارتباط دارد. در خاک‌های استان خوزستان که سومین تولیدکننده چغندر قند با وسعت ۱۸ هزار هکتار و ۱/۱ میلیون تن تولید است (بی‌نام، ۱۴۰۱). محدودیت‌ها غالباً شوری و قلیائیت، شیب، گچ، زهکشی و پهاش خاک است. مقایسه عوامل محدودکننده در میان استان‌ها مشخص کرد که در استان خوزستان عامل زهکشی افزون‌ترین و در استان خراسان شمالی عامل شوری و قلیائیت افزون‌ترین نقش را در کاستن از توان تولید اراضی دارد.

تنش شوری عامل مهمی است که بر رشد گیاه تأثیر می‌گذارد. چغندر قند در مقایسه با سایر محصولات کشاورزی مقاوم به نمک است اما در مرحله جوانه‌زنی و گیاهچه به نمک بسیار حساس بوده و در این مراحل زندگی در صورت شور بودن خاک جذب آب در طی مرحله جوانه‌زنی گیاه کاسته می‌شود. شرایط تنش شوری تا حدودی برای جوانه‌زنی و رشد گیاهچه ضروری است. با این حال، رشد چغندر قند در سطح شوری تا ۷ دسی‌زیمنس بر متر تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد. تحمل تنش اسمزی، حذف یون و تحمل بافت‌های زنده در برابر تنش شوری از طریق بسته شدن روزنه برگ، انبساط برگ، مهار فروغ‌آمایی^۱ و کاهش تولید زیست‌توده^۲، پاسخ‌های گیاه چغندر قند تحت تنش به افزایش شوری است. این گونه سازگاری‌ها و سازوکار^۳ آن‌ها در چغندر قند به رشد گیاهان در خاک بی‌کیفیت بدون از دست دادن عملکرد تا حد زیادی کمک می‌کند (طیب و همکاران، ۲۰۲۳). سدیم یکی از عناصر مهم در ریشه گیاه چغندر قند است که در کیفیت آن سهم به‌سزایی دارد. اهمیت سدیم به این دلیل است که موجب کاهش استخراج قند از ریشه در کارخانه‌های قند می‌شود. اگر برگ صدمه دیده باشد، معمولاً مقدار سدیم برگ افزایش می‌یابد. با افزایش شدت صدمات برگ، میزان سدیم ریشه نیز افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه کیفیت قند استحصالی نیز کاهش پیدا می‌کند. صدمات برگ در کاهش درصد قند موجود در ریشه و هم‌چنین قند قابل استحصال تأثیرگذار است (ایماز و ارتک، ۲۰۱۵). یکی از ویژگی‌های خاک که می‌تواند این مشکلات را در چغندر قند ایجاد و تسریع کند شوری و قلیائیت بیش از حد خاک است؛ بنابراین کشت چغندر قند در خاک‌های دارای محدودیت شوری و قلیائیت غالباً با افت کیفیت محصول، کاهش عملکرد و کاهش مقدار قند همراه خواهد بود (طیب و همکاران، ۲۰۲۳). اقلیم در رشد و توسعه چغندر قند نقش مهمی دارد. به‌طوری‌که تغییر آب و هوا نه تنها خطر تنش

^۱ Mechanssem

^۱ Photosynthesis

^۲ Biomass

خشکی را افزایش می‌دهد، بلکه باعث افزایش فشار آلودگی آفات و بیماری‌ها هم می‌گردد و در نهایت عملکرد را به شدت کاهش می‌دهد؛ بنابراین در مناطقی که شرایط مناسب اقلیمی برای کشت چغندر قند وجود ندارد نایبستی نسبت به کاشت این گیاه اقدام شود (هافمن و کتر، ۲۰۱۸). بررسی اطلاعات و سطح زیرکشت اراضی تحت کشت آبی در کشور نشان می‌دهد که استان فارس با سطح زیرکشت ۱۸ هزار هکتار و تولید ۵۳/۴ هزار تن، رتبه اول را در تولید پنبه در کشور دارد (بی‌نام، ۱۴۰۱). کشت پنبه در استان فارس دارای محدودیت اقلیمی متوسط دما در مرحله گل‌دهی و مرحله رسیدگی است که قابل اصلاح نیست. این عامل اقلیمی یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در کاهش عملکرد این محصول در این استان محسوب می‌شود. غالب محدودیت‌ها در کلاس‌های S2 و S3 شامل شیب، آهک، اقلیم، پهاش و بافت خاک است. در کلاس‌های نامناسب خاک‌ها عمدتاً با عوامل شوری و قلیائیت، آهک، گچ و پهاش نامناسب خاک محدود شده‌اند. عامل اصلی افزایش پهاش خاک‌ها مقدار آهک و قلیائیت قابل ملاحظه در آن‌ها است. گلستان با سطح زیرکشت ۱۵ هزار هکتار و تولید ۲۹ هزار تن از نظر وسعت کشت در رتبه بعدی قرار دارد (بی‌نام، ۱۴۰۱). متوسط عملکرد پنبه در استان گلستان ۱/۹ تن در هکتار است که در مقایسه با استان فارس با متوسط عملکرد ۲/۹ تن در هکتار کمتر است. این کاهش عملکرد در گلستان غالباً به دلیل محدودیت متوسط دما در مرحله رسیدگی در تمامی واحدهای خاک مورد مطالعه در این استان است. در استان گلستان کلاس S1 برای کشت پنبه وجود نداشت. غالب محدودیت‌ها در خاک‌های استان گلستان شوری خاک، بافت و زهکشی است. استان اردبیل افزون‌ترین مقدار عملکرد در واحد سطح را با متوسط عملکرد حدود ۴ تن در هکتار دارد. دلیل این امر وجود خاک‌های نسبتاً مرغوب در این استان به‌ویژه در منطقه مغان است که با وجود برخی محدودیت‌های اقلیمی مثل محدودیت متوسط دما و رطوبت نسبی این عملکرد بهینه حاصل می‌شود. شوری

خاک باعث کاهش جوانه‌زنی، افت رشد رویشی گیاه و نهایتاً مقدار عملکرد و کیفیت پنبه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (خرسندی و آناگلی، ۲۰۰۹؛ ظفر و همکاران، ۲۰۲۲). هم‌چنین استرس شوری به‌ویژه شوری‌های بیشتر از dSm^{-1} باعث کاهش تعداد غوزه و زود رسیدن پنبه می‌شود (رزاجی و همکاران، ۲۰۱۹). بر طبق اظهارات شریف و همکاران (۲۰۱۹)، تنش شوری در پنبه منجر به تأخیر در گل‌دهی، باردهی کمتر، ریزش میوه و کاهش وزن غوزه می‌شود که همگی این عوامل در کاهش عملکرد پنبه‌دانه تأثیر دارند. ساتی‌یامورتی و همکاران (۲۰۲۲)، در بررسی اراضی منطقه پرامبالور هند، عوامل محدودکننده برای رشد و نمو پنبه را شوری زیاد خاک، بافت خاک سنگین و شیب ذکر کرده‌اند. ممتکولوف و همکاران (۲۰۲۲)، در ارزیابی تناسب اراضی کومکورگان ازبکستان، مهم‌ترین عوامل محدودکننده را بافت خاک، شیب، شوری خاک و زهکشی ذکر کرده‌اند.

بیشترین مقدار تولید گلرنگ در سطح کشور مربوط به استان اصفهان با وسعت ۱/۱ هزار هکتار، در حدود ۳/۲ هزار تن گزارش شده است (بی‌نام، ۱۴۰۱). کشت گلرنگ در منطقه شهرضا و شرق اصفهان به دلیل محدودیت متوسط دما در ماه اول چرخه رشد غالباً دارای محدودیت است. مهم‌ترین عامل محدودیت در کلاس‌های S2 و S3 ویژگی پهاش بوده و در کلاس‌های نامناسب آهک، بافت و شوری خاک عوامل محدودکننده محسوب می‌شوند. بررسی مقادیر ویژگی‌های اراضی مشخص کرد که در واحدهایی که پهاش خاک باعث کاهش توان اراضی شده است آهک خاک قابل ملاحظه است؛ بنابراین می‌توان گفت که عامل افزایش پهاش، زیاد بودن مقدار آهک در خاک این واحدها است. سید و همکاران (۲۰۱۰)، در مطالعه خود به اثرات سوء آهک در افزایش پهاش خاک و بهم‌ریختن تعادل تغذیه‌ای عناصر در یک خاک آهکی تحت کشت گیاه گلرنگ اشاره کرده‌اند. استان آذربایجان شرقی با ۳۴۰ هکتار و ۲۰۰ تن تولید و استان فارس با ۲۳۰ هکتار و ۳۳۶ تن تولید در رتبه‌های بعدی

قرار دارند. رشد و توسعه گلرنگ در مناطقی از اهر، جلفا و میانه به دلیل محدودیت اقلیمی متوسط دما در ماه اول چرخه رشد، متوسط حداکثر دما در مراحل سبزی‌نگی و رسیدگی محدود شده است. در کلاس‌های S2 و S3 بیشتر محدودیت به دلیل پهاش خاک و در کلاس‌های نامناسب عمدتاً شامل شیب، شوری و پهاش خاک است. در استان فارس در مناطقی از اقلید، درودزن و زرقان به دلیل محدودیت متوسط حداکثر دما در مرحله سبزی‌نگی کلاس تناسب اراضی به سمت کاهش تناسب رفته و قطعاً تولید تحت تأثیر قرار گرفته است. در کلاس‌های مناسب اراضی مورد بررسی این استان محدودیت‌ها بیشتر متأثر از آهک خاک و پهاش است. بافت خاک، شوری، آهک و پهاش مهم‌ترین عواملی هستند که باعث کاهش توان اراضی و قرار گرفتن آن‌ها در کلاس‌های نامناسب N1 و N2 شده‌اند.

شوری خاک با ایجاد تنش اُسمزی و عدم تعادل مواد مغذی باعث کاهش رشد و عملکرد گلرنگ می‌شود. مقدار زیاد یون‌های سدیم در بافت‌های گیاهی باعث اختلال در تنظیم فشار اُسمزی و تعادل مواد مغذی شده و در اثر سمیت ویژه سدیم رشد گیاه متأثر شده و از مقدار تولید کاسته می‌شود (فرهنگی آبریز و قاسمی گل‌عدانی، ۲۰۲۱). شوری خاک نه تنها عملکرد محصول را تحت تأثیر قرار می‌دهد بلکه باعث کاهش درصد روغن دانه‌ها می‌شود. این موضوع به علت افزایش درصد پوست دانه‌ها در شرایط شور است. ولی کیفیت روغن گلرنگ تحت تأثیر درجه شوری واقع نمی‌شود. شوری خاک هم‌چنین زمان گل‌دهی را تا چند روز و زمان رسیدگی را تا چند هفته به جلو می‌اندازد (بیلاقی و همکاران، ۲۰۱۲؛ ایمونگور و ایمونگور، ۲۰۲۳). برای کاهش اثرات سوء شوری در واحدهای خاک تحت تأثیر این ویژگی، تغییر روش آبیاری، روش کاشت، استفاده از ارقام مقاوم، ترکیب و نوع کودها می‌تواند مؤثر باشد.

خوزستان با ۹۰ هزار هکتار سطح زیرکشت، دارای ۶ میلیون تن تولید نیشکر است (بی‌نام، ۱۴۰۱). خاک‌های قرار گرفته در کلاس‌های S2 و S3 برای کشت

نیشکر در این استان بیشتر از نظر اقلیمی، متوسط دمای روز در مرحله جوانه‌زنی، دارای محدودیت بوده و دچار افت توان اراضی هستند. شوری و قلیائیت خاک، پهاش و گچ مهم‌ترین ویژگی‌های محدودکننده اراضی در استان خوزستان در کلاس‌های نامناسب N1 و N2 می‌باشند. عامل شوری در رشد و توسعه نیشکر بسیار تأثیرگذار است. گیاه نیشکر نسبتاً حساس به شوری بوده و آستانه آن برای کاهش عملکرد حدود $1/7 \text{ dS m}^{-1}$ است (مورایس و همکاران، ۲۰۲۲؛ گوپی کریشن و همکاران، ۲۰۲۲).

در ازای هر واحد افزایش شوری در ناحیه رشد و توسعه ریشه نیشکر عملکرد آن در حدود ۱۴ تن در هکتار افت کرده و مقدار قند (ساکاروز) نیز کاهش می‌یابد (چیکوناتو و همکاران، ۲۰۱۹؛ دل‌امینی و ژو، ۲۰۲۲)؛ بنابراین در اراضی مورد بررسی برای کشت آبی نیشکر نیاز به استفاده از زهکش زیرزمینی برای جلوگیری از تجمع نمک و شستشوی نمک اضافی در ناحیه توسعه ریشه است. هم‌چنین این گیاه به شرایط ماندابی خاک حساس است. در اراضی ماندابی وزن نی آن از ۱۲ تا ۴۱ درصد کاهش می‌یابد. کاهش وزن نی در اراضی ماندابی به علت کاهش کارایی فرآیند فروغ‌آمایی، کاهش توسعه ریشه، کاهش سطح برگ، مرگ نی، افتادگی و شکستگی نی است (سینگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ مورایس و همکاران، ۲۰۲۲). نیشکر در خاک‌های با بافت سبک به دلیل کم بودن مقدار گنجایش تبادل کاتیونی خاک از نظر حاصلخیزی دچار مشکل می‌شود بنابراین کشت آن در این گونه اراضی توصیه نمی‌شود (ارشد و همکاران، ۲۰۱۹).

تفکیک اراضی مستعد از غیرمستعد در نقشه‌های تناسب اراضی، مدیریت اراضی و برنامه‌ریزی برای کشت را تسهیل می‌کند. هم‌چنین توجه به نقشه‌های تناسب اراضی برای کشت محصولات صنعتی می‌تواند در حفاظت از اراضی و جلوگیری از تخریب آن‌ها مؤثر باشد. افزون‌براین با توجه به مشخص شدن نوع محدودیت‌ها در اراضی با تناسب کمتر یا نامناسب، امکان اصلاح و رفع محدودیت‌ها

وجود داشته و سطح کیفیت اراضی در صورت مرتفع شدن مسائل محدودکننده افزایش خواهد یافت.

نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق می‌تواند در مدیریت صحیح و علمی اراضی تحت کشت، برنامه‌ریزی کارآمد استفاده از اراضی و تعیین علمی انتخاب نوع کشت به‌صورت ویژه مکانی و منطقه‌ای سودمند باشد. در این مطالعه تناسب اراضی برای کشت گیاهان صنعتی شامل چغندرقد، پنبه، گلرنگ و نیشکر در دشت‌های آبی بر اساس چهارچوب فائو و روش پارامتریک ریشه دوم مورد ارزیابی قرار گرفت و اراضی مناسب و نامناسب طبق نقشه‌های تناسب اراضی بر پایه ویژگی‌های اقلیم، توپوگرافی و خاک برای کشت محصولات فوق مشخص و

از هم تفکیک گردید. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، کشت محصولات موردبررسی در اراضی مناسب توصیه‌شده و در اراضی نامناسب به دلیل هزینه‌بر بودن و شدت محدودیت که عملکرد را کاهش می‌دهد، پیشنهاد نمی‌گردد. هم‌چنین این نقشه‌ها به دلیل دارا بودن اطلاعات قابل‌ملاحظه، می‌توانند در برنامه‌ریزی و تدوین الگوی کشت مورداستفاده قرار گیرند.

تشکر و قدردانی

مقاله حاضر از طرح تحقیقاتی ملی به شماره مصوب ۹۴۵۲-۱۰-۱۰-۰۱۴ که با حمایت مالی معاونت امور زراعت وزارت جهاد کشاورزی در مؤسسه تحقیقات خاک و آب انجام‌شده، استخراج گردیده است که بدین‌وسیله تشکر و قدردانی می‌گردد.

فهرست منابع

۱. بی‌نام. ۱۴۰۱. آمارنامه کشاورزی، جلد اول: محصولات زراعی. وزارت جهاد کشاورزی، معاونت آمار مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات، ۱۰۰ صفحه.
۲. جمشیدی، م. ۱۳۹۸. ایجاد لایه‌های اطلاعاتی رقومی منابع خاک اراضی آبی کشور. مؤسسه تحقیقات خاک و آب، گزارش شماره ۵۷۰۰۲، ۱۴۷ صفحه.
۳. سرمیدیان، ف.، فاتحی، ش. و محمودی، ش. ۱۳۸۳. بررسی و تعیین تناسب کیفی اراضی برای محصولات فاریاب (گندم، جو و پنبه) در منطقه اشتهاورد. علوم کشاورزی ایران، ۳۵(۳): ۶۵۷-۶۶۸.
۴. سیدجلالی، س.ع.، نویدی، م.ن.، زین الدینی میمند، ع.، محمداسماعیل، ز. ۱۳۹۸. نیازهای رویشی گیاهان زراعی. مؤسسه تحقیقات خاک و آب. ۲۵۰ صفحه.
۵. سیدمحمدی، ج.، نویدی، م.ن.، سیدجلالی، س.ع.، فرج‌نیا، ا. و فاتحی، ش. ۱۴۰۱. تحلیل محدودیت‌های اراضی و تعیین درجه تناسب آن‌ها برای کشت غلات در اراضی تحت کشت آبی کشور. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳(۹): ۱۹۵۷-۱۹۷۸.
۶. ظهیرنیا، ع. و متین‌فر، ح. ۱۳۹۸. تعیین تناسب اراضی مزارع نیشکر مبتنی بر شاخص کیفیت خاک با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی. علوم آب و خاک، ۲۳(۲): ۱۷۳-۱۸۸.
۷. فرج‌نیا، ا. ۱۳۸۶. ارزیابی تناسب اراضی و تعیین پتانسیل تولید چغندرقد در دشت یکانات مرند. چغندرقد، ۲۳(۱): ۴۳-۵۴.
۸. محمدی، ا.، پاشایی اول، ع.، مساواتی، س.، صادقی، س. ۱۳۸۶. ارزیابی تناسب کیفی اراضی برای محصولات عمده زراعی منطقه گنبدکاووس. علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۴(۵): ۹۹-۱۱۱.

۹. مرادی شرف، م. ۱۳۹۲. ارزیابی کیفی و کمی اراضی برای کشت بادام‌زمینی در بخش‌های شرقی استان گیلان. اولین کنفرانس ملی الکترونیکی علوم کشاورزی و محیط زیست، شیراز، ایران.
۱۰. منتخبی کلجاهی، و.، جعفرزاده، ع.، شهبازی، ف. ۱۳۹۲. ارزیابی کیفی تناسب اراضی ایستگاه تحقیقاتی کرکج برای چغندر قند، پیاز و گلرنگ با روش‌های محدودیت ساده و پارامتریک ریشه دوم. دانش آب و خاک، ۲۳(۲): ۱-۱۲.
۱۱. میزرائی شیرینی، ز. و فرودی، م. ۱۳۹۳. ارزیابی کیفی تناسب اراضی برای محصول پنبه در بخشی از منطقه طارم استان زنجان. همایش بین‌المللی پژوهش‌های کاربردی در کشاورزی، تهران، ایران.
۱۲. نویدی، م. ن.، سید محمدی، ج.، سیدجلالی، س. ع.، زین الدینی، ع.، فرج نیا، ا. و زارعیان، غ.، تومانیان، ن.، فاتحی، ش.، اسکندری، م. و دلسوز، ب. ۱۴۰۱. ارزیابی تناسب اراضی برای کشت گندم در دشت‌های آبی کشور. پژوهش‌های خاک، ۳۶(۲): ۱۰۹-۲۲۴.
13. Arshad, M., Li, N., Zhao, D., Sefton, M., & Triantafilis, J. 2019. Comparing management zone maps to address in fertility and sodicity in sugarcane fields. *Soil and Tillage Research*, 193, 122-132.
14. Behera, S.K., Mathur, R.K., Shukla, A.K., Suresh, K., & Prakash, C. 2018. Spatial variability of soil properties and delineation of soil management zones of oil palm plantations grown in a hot and humid tropical region of southern India. *Catena* 165, 251-259.
15. Chiconato, D.A., Junior, G.S., Santos, D. & Munns, R. 2019. Adaptation of sugarcane plants to saline soil. *Environmental and Experimental Botany*, 162, 201-211.
16. Davatgar, N., Neishabouri, M.R. & Sepaskhah, A.R. 2012. Delineation of site specific nutrient management zones for a paddy cultivated area based on soil fertility using fuzzy clustering. *Geoderma* 173-174:111-118.
17. Dlamini N.E. & Zhou, M. 2022. Soils and seasons effect on sugarcane ratoon yield. *Field Crops Research*, 284, 108588
18. Emongor, V.E. & Emongor R.A. 2023. Safflower (*Carthamus tinctorius* L.), in: *Neglected and Underutilized Crops, Future Smart Food*, Ed; Farooq, M. and Siddique K.H.M. Academic Press, Pp: 683-731.
19. Esfandiarpour Borujeni, I., Mohammadi, J., Salehi, M.H., Toomanian, N. & Poch, R.M. (2010). Assessing geopedological soil mapping approach by statistical and geostatistical methods: A case study in the Borujen region, Central Iran. *Catena* 82, 1-14.
20. FAO. 1976. A framework for land evaluation. *FAO Soils Bulletin*, No. 32. Rome: Land and Water Development Division, FAO, UN.
21. Farhangi-Abriz, S., and Ghassemi-Golezan, K. 2021. Changes in soil properties and salt tolerance of safflower in response to biochar-based metal oxide nanocomposites of magnesium and manganese. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 211, 111904.
22. Gandhi, G., and Savalia, S.G. 2014. Soil-site suitability evaluation for mustard in calcareous soils of Girnar toposequence in Southern Saurashtra region of Gujarat. *Journal of Oilseed Brassica*, 5(2), 128-133.
23. Gopikrishnan, S., Srivastava G. & Priakanth, P. 2022. Improving sugarcane production in saline soils with Machine Learning and the Internet of Things. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 35, 100743.
24. Hoffmann, C.M. & Kenter, C. 2018. Yield potential of sugar beet - have we hit the ceiling? *Frontiers in Plant Science*, 9, 289. doi:10.3389/fpls.2018.00289.
25. Khorsandi, F., & Anaghali, A. 2009. Reproductive compensation of cotton after salt stress relief at different growth stages. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 195: 278-283.

26. Kiyamaz, S. & Ertek, A. 2015. Yield and quality of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) at different water and nitrogen levels under the climatic conditions of Kirschir, Turkey. *Agricultural Water Management* 158: 156-165
27. Mamatkulov, Z., Abdivaitov, K., Hennig, S., & Safarov, E. 2022. Land suitability assessment for cotton cultivation - a case study of Kumkurgan district, Uzbekistan. *International Journal of Geoinformatics*, 18(1), 71-80.
28. Mandal, S., Choudhury, B.U. & Satpati, L. 2020. Soil site suitability analysis using geo-statistical and visualization techniques for selected winter crops in Sagar Island, India. *Applied Geography*, 122, 102249.
29. Morais, et al., 2022. Sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) under saline stress: Growth, productivity, technological quality, and industrial yield. *Industrial Crops and Products*, 188, 115642.
30. Navidi, M.N., Chatrenour, M., Seyedmohammadi, J., Delsous Khaki, B., Moradi-Majd, N., & Mirzaei, S. 2023. Ecological potential assessment and land use area estimation of agricultural lands based on multi-time images of Sentinel-2 using ANP-WLC and GIS in Bastam, Iran. *Environmental, Monitoring and Assessment*, 195, 36.
31. Navidi, M.N., Seyedmohammadi, J. & McDowell, R.W. 2022b. A proposed new approach to identify limiting factors in assessing land suitability for sustainable land management. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 53(19):2558-2573. doi:10.1080/00103624.2022.2072511.
32. Razaji, A., Paknejad, F., Moarefi, M., Damghani, A. M., & Ilkaee, M.N. 2019. Meta-analysis of the effects of salinity stress on cotton (*gossypium* spp.) growth and yield in Iran. *Journal of Agricultural Sciences*, 26(1): 94-103.
33. Sathiyamurthi, S., Saravanan, S., Sankriti, R., Aluru, M., Sivaranjani, S., & Srivel, R. 2022. Integrated GIS and AHP techniques for land suitability assessment of cotton crop in Perambalur District, South India. *International Journal of System Assurance Engineering*. doi:10.1007/s13198-022-01705-2.
34. Sayyad, Gh., Afyuni, M., Mousavi, S.F., Abbaspour, K.C., Richards, B.K., & Schulin, R. 2010. Transport of Cd, Cu, Pb and Zn in a calcareous soil under wheat and safflower cultivation, a column study. *Geoderma*, 154(3-4), 311-320.
35. Seyedmohammadi, J. & Navidi, M.N. 2022. Applying fuzzy inference system and analytic network process based on GIS to determine land suitability potential for agricultural. *Environ. Monit. Assess.* 194, 712.
36. Seyedmohammadi, J., Sarmadian, F., Jafarzadeh, A.A., & McDowel, R.W., 2019. Development of a model using matter element, AHP and GIS techniques to assess the suitability of land for agriculture. *Geoderma* 352, 80-95.
37. Sharif I, Aleem S, Farooq J, Rizwan M, Younas A, Sarwar G, Chohan SM. 2019. Salinity stress in cotton: effects, mechanism of tolerance and its management strategies. *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 25(4): 807-820. doi: 10.1007/s12298-019-00676-2.
38. Singh, S., Singh, S.P., Pathak, A.D., & Pandey, N. 2019. Assessment of waterlogging induced physiobiochemical changes in sugarcane varieties and its association with waterlogging tolerance. *Journal of Environmental Biology*, 40(3): 384-392.
39. Sposito, C. 2016. *The Chemistry of Soils*. 3rd edition, Oxford University Press, 272p.
40. Tayyab, M., Wakeel, A., Mubarak, M.U., Artyszak, A., Ali, S., Hakki, E.E., Mahmood, K., Song, B. & Ishfaq, M. 2023. Sugar Beet cultivation in the tropics and subtropics: challenges and opportunities. *Agronomy*, 13, 1213. <https://doi.org/10.3390/agronomy13051213>.
41. Tripathi, R., Nayak, A.K., Shahid, M., Lal, B., Gautam, P., Raja, R., Mohanty, S., Kumar, A., Panda, B.B., & Sahoo, R.N., 2015. Delineation of soil

- management zones for a rice cultivated area in eastern India using fuzzy clustering. *Catena* 133, 128-136.
42. Yeilaghi, H., Arzani A., Ghaderian, M., Fotovat, R., Feizi, M., & Pourdad, S.S. 2012. Effect of salinity on seed oil content and fatty acid composition of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) genotypes. *Food Chemistry*, 130:3, 618-625.
43. Zafar, M.M., Shakeel, A., Haroon, M., Manan, A., Sahar A. and Shoukat A. 2022. Effects of salinity stress on some growth, physiological, and biochemical parameters in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) germplasm. *Journal of Natural Fibers*, 19(14):885



فرا تحلیل نتایج پژوهش‌های تاثیر مصرف کودهای دامی، زیستی و نیتروژن بر صفات

کمی و کیفی چغندر قند

سمر خیامیم*، حمید نوشاد، بابک بابایی، اباذر رجبی و شهرام خدادادی

استادیار موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران samar.khayam@gmail.com

استادیار موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندر قند، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران hamidnoshad@yahoo.com

استادیار موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندر قند، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران babak.babae@yahoo.com

استاد موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندر قند، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران abazar.rajabi@yahoo.com

موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندر قند، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران shahram.kh@yahoo.com

«مقاله پژوهشی»

دریافت: ۱۴۰۲/۸/۱۶ و پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۱

چکیده

ناخالصی‌های ریشه چغندر قند به ویژه سدیم یکی از عوامل موثر بر کیفیت ریشه و ضریب استحصال قند است. عوامل مختلف از جمله شرایط خاک، زمان و مقدار مصرف کودهای مختلف بر مقدار قند قابل استحصال در کارخانه، اثر دارد. به منظور بررسی عوامل تاثیرگذار بر مقدار ناخالصی‌ها و صفات کمی و کیفی ریشه، در یک تجزیه فرا تحلیل، داده‌ها و نتایج تحقیقات انجام شده طی سال‌های ۱۳۷۶ تا ۱۳۹۹ که در ۳۰ گزارش نهایی موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندر قند منتشر شده بود، تجزیه و تحلیل شد. داده‌های این گزارش‌ها در پایگاه داده‌ای شامل ۴۸۰ ردیف در ۲۶ ستون ایجاد گردید. داده‌های متناظر با تیمارهای مورد بررسی شامل کود دامی، فرآورده باکتری و اسید آمینه، مقدار و زمان مصرف نیتروژن از پایگاه داده استخراج و سپس نسبت واکنش (نسبت تغییرات صفات هر تیمار به شاهد تیمار در همان آزمایش)، میانگین وزنی نسبت واکنش، انحراف معیار و اثرات معنی‌دار سهم هر یک از عوامل بر صفات کمی و کیفی ریشه چغندر قند مشخص شد. نتایج نشان داد که مصرف ۶۰ تن در هکتار کود دامی، ۲۰۰-۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن و تقسیط ۲۵٪ کود نیتروژن قبل از کاشت، ۵۰٪ در زمان تنک و ۲۵٪ در زمان تنک دوم، ضمن افزایش معنی‌دار عملکرد ریشه، عملکرد قند خالص و عملکرد قند ناخالص، بر میزان سدیم ریشه چغندر قند تاثیر معنی‌داری نداشت. مصرف بیش از حد نیتروژن به مقدار ۳۰۰-۲۵۰ کیلوگرم در هکتار و مصرف تمام کود نیتروژن بعد از کاشت ضمن عدم تاثیر معنی‌دار بر عملکرد ریشه، عملکرد قند ناخالص و عملکرد قند خالص به ترتیب موجب افزایش سدیم ریشه به مقدار ۱۸٪ و ۷/۵٪ شد. فرآورده باکتری و اسید آمینه تنها باعث افزایش درصد قند ناخالص ریشه چغندر قند به مقدار ۱٪ گردید.

کلمات کلیدی: تقسیط کود، سدیم ریشه چغندر قند، عملکرد قند خالص، کود آلی، کود نیتروژن



مقدمه

مطالعات متعددی در زمینه های مختلف محصولات کشاورزی از جمله چغندر قند صورت گرفته است. هرچند هر تحقیقی به طور جداگانه ارزش ویژه ای دارد، ضرورت دارد نتایج این تحقیقات متعدد در کنار یکدیگر بررسی شوند تا بتوان به یک جمع بندی در مورد عوامل موثر بر تولید محصولات کشاورزی دست یافت (سلطانی و سلطانی ۱۳۹۳). فرا تحلیل در علوم کشاورزی روش نسبتاً جدیدی است که تاکنون کمتر به آن پرداخته شده است (روتوندو، ۲۰۰۹). فراتحلیل، به ارتباط ویژگی های یک مطالعه با مطالعه دیگر از طریق روش های آماری مرتبط تاکید می کند. روش فراتحلیل به علت فراهم کردن نتیجه گیری مطمئن تر نسبت به روش های سنتی، شکاف های موجود بین پیشینه موضوعات پژوهشی را پر می کند و در نتیجه خلاء زمینه پژوهش های بعدی را به محقق نشان می دهد (سلطانی و سلطانی، ۱۳۹۳). در مطالعه فرا تحلیل انجام شده طی ۸۰ سال (۱۹۲۷-۲۰۰۷) در فنلاند مشخص شد کاربرد کود فسفر در اغلب گیاهان زراعی سبب افزایش عملکرد تا حدود ۱۱ درصد شده است (والکاما و همکاران، ۲۰۰۸). در مطالعه ای بر روی مقالات ISI قبل از سال ۲۰۱۲ کاربرد کودهای نیتروژن با کارایی بالا (Enhanced efficiency nitrogen fertilizers) بر عملکرد برنج مورد مطالعه قرار گرفت و مشخص شد کاربرد این کودها باعث افزایش ۵/۷ درصدی عملکرد و افزایش ۸ درصدی جذب نیتروژن گردید (لینکویست و همکاران، ۲۰۱۳).

در مطالعه فرا تحلیل ۱۶۱ مطالعه مستقل در مورد تاثیر مصرف نیتروژن بر چغندر قند از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۸ در انگلستان مشخص شد مدل درجه دو برای توجیه تغییرات مناسب تر بوده و چغندرهای رشد کرده در خاک های با مواد آلی، به نیتروژن پاسخی نداده اند. تغییرات سطح مطلوب نیتروژن مورد نیاز در مکان های مختلف، نمی تواند فاکتورهایی را که برای پیش بینی مقدار کود مصرفی بکار می روند، توجیه

کند. با توجه به قیمت کود و میزان عملکرد چغندر قند، مقدار اقتصادی مصرف نیتروژن ۱۱۰-۱۰۰ کیلوگرم در هکتار توصیه شده بود و نیاز چغندر قند به نیتروژن، قابل پیش بینی نیست زیرا این تغییرات ناشی از خطای آزمایش است (جاگارد و همکاران ۲۰۰۹).

در مطالعه بر روی ۱۴ تحقیق انجام شده با سطوح نیتروژن از شاهد تا مصرف ۳۰۰ کیلوگرم نیتروژن مشخص شد افزایش سطح نیتروژن تا ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار باعث افزایش عیار قند و شکر سفید تولیدی، نسبت به شاهد شد و سپس روندی کاهشی به خود گرفت. اما در مقابل افزایش سطح نیتروژن باعث افزایش عملکرد ریشه، درصد سدیم، پتاسیم، ازت مضره و قند ملاس گردید. بر اساس درصد قند و عملکرد ریشه، مصرف نیتروژن در محدوده ۵۰ تا ۱۰۰ کیلوگرم مناسب بود (صادقی شعاع و همکاران، ۱۳۹۴).

سدیم یکی از عناصر ضروری برای گیاه بوده و خیلی ضعیف تر از پتاسیم و سایر کاتیون ها به کلئیدهای خاک متصل است لذا به راحتی با یون آمونیوم جابجا شده و در محلول خاک برای گیاه قابل دسترس می شود. به طور کلی هر عاملی که باعث افزایش غلظت این کاتیون در محلول خاک شود جذب این عنصر را توسط چغندر قند افزایش می دهد (مجللی ۱۳۷۳). میانگین سدیم ریشه طی سال های مختلف در کشور حدود ۳/۶ (عبدالهیان، ۱۳۸۳) و بین یک تا هشت میلی اکای والان در صد گرم خمیر ریشه (نوشاد و همکاران ۱۳۸۵) گزارش شده است این در حالی است که طی همین سال ها میانگین سدیم ریشه در کشورهای مختلف جهان بین ۲/۹ (عبدالهیان، ۱۳۸۳) و ۱/۴۵ میلی اکای والان در ۱۰۰ گرم خمیر ریشه گزارش شد (درایکوت ۲۰۰۶). عوامل مختلفی در افزایش میزان سدیم ریشه و در نتیجه کاهش درصد قند و کیفیت چغندر قند موثر هستند که باید مورد مطالعه قرار گیرد. عوامل مختلفی بر تغییرات سدیم ریشه تاثیر می گذارد. سوال اصلی تحقیق آن است که آیا می توان مجموعه عوامل موثر بر این تغییرات را به صورت فرا تحلیل مورد مطالعه قرار داد و

به توصیه کاربردی دست یافت؟ نظر به این که نتایج روش فرا تحلیل مبتنی بر تجزیه‌های آماری است و بر اساس روش‌های تجزیه و تحلیل مبتنی بر آمار به بررسی جنبه‌های مختلف یک موضوع می‌پردازد، لذا با بکارگیری این روش می‌توان تاثیر عوامل مختلف بر افزایش سدیم و کاهش کیفیت ریشه چغندر قند را طی سنوات متعدد بررسی نمود. در این مطالعه با کمک تجزیه آماری فرا تحلیل، اثر عوامل کودی بر محصول چغندر قند بررسی و سپس راهکارهای مدیریتی جهت کاهش سدیم و افزایش کیفیت ریشه چغندر قند ارائه شد.

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی عوامل موثر بر مقدار جذب اجزاء ناخالصی به ویژه سدیم ریشه و تاثیر آن بر کمیت و کیفیت محصول چغندر قند، داده‌های گزارش‌های نهایی طرح‌های تحقیقاتی کودی موسسه تحقیقات چغندر قند در فاصله ۱۳۷۶ تا ۱۳۹۹ جمع‌آوری و مورد استفاده قرار گرفت. برای این منظور ۷۵۷ گزارش نهایی مورد مطالعه و مورد بررسی قرار گرفت و ۳۰ گزارش مرتبط با موضوع تیمارهای کودی انتخاب گردید. داده‌ها از گزارش‌های مذکور استخراج و فایل اکسلی متشکل از ۲۶ ستون و ۴۸۰ ردیف بدست آمد. سپس برای هر موضوع پایگاه داده محدود شد مثلاً برای کود دامی ۱۷ مطالعه مورد بررسی قرار گرفت و برای عوامل دیگر تعداد دیگری مطالعه، مورد بررسی قرار گرفت. برای استخراج داده‌ها و وزن‌دهی به آن‌ها و همین‌طور بررسی ناهمگنی آن‌ها، در حین کار فایل گزارش‌های نهایی مورد واکاوی و بررسی مجدد قرار گرفت. مثلاً وقتی تیمار کود نیتروژن مورد مطالعه بود، تیمارها بر اساس مقادیر و زمان مصرف این کود متجانس شدند. چکیده، مواد و روش‌ها و نتایج گزارش به دقت و مجدداً بررسی شد تا اعتبار داده‌ها و وزن‌دهی به آن‌ها مشخص گردد. قابل ذکر است نتایج آزمایش‌هایی گزینش شدند که دارای تکرار و تیمار شاهد بودند. با توجه به این که حجم

داده‌ها بسیار زیاد بود اثرات تیمارهای کودی روی عملکرد ریشه (RY)، عملکرد قند ناخالص (SY) و خالص (WSY)، درصد قند ناخالص (Pol) و خالص (WSC) و مقدار سدیم ریشه (Na)، ضریب استحصال شکر (ECS) و درصد قند ملاس (MS) بررسی شد و سایر صفات کیفی ریشه شامل پتاسیم و آلfa آمینو نیتروژن مد نظر قرار نگرفت، زیرا این دو عامل در محاسبه قند ملاس لحاظ شده است.

روش مورد استفاده در مطالعه فراتحلیل، روش استوفر (استوفر ۱۹۴۹) بود که در بیشتر مطالعات اکولوژیکی و زراعی از آن استفاده می‌شود. در این روش اندازه اثر محاسبه شده (اوسنبرگ و همکاران، ۱۹۹۹) و حدود اطمینان آن حول میانگین‌ها و یا شیب‌ها تعیین می‌شود (سلطانی و سلطانی ۱۳۹۳). مراحل محاسبه به صورت زیر است:

۱- محاسبه نسبت واکنش (R): میانگین تیمارها به شاهد در هر آزمایش به طور جداگانه

۲- تبدیل لگاریتمی نسبت واکنش ($\ln R$)

۳- وزن‌دهی به نسبت واکنش $\ln R * W_i$. برای وزن‌دهی، اثرات سال، تعداد مکان، تکرار، میانگین‌های سایر تیمارها در آزمایش ملاک قرار می‌گیرد. در برخی آزمایش‌ها میانگین مرکب داده‌ها در گزارش ارائه شده بود. لذا برای وزن‌دهی باید اثرات فوق تفکیک و محاسبه می‌شد و در وزن‌دهی مدنظر قرار می‌گرفت.

۴ محاسبه میانگین وزن‌دهی شده لگاریتم نسبت واکنش که بیشترین دقت (کمترین واریانس) را ایجاد می‌کند به شرح فرمول زیر:

$$\overline{\ln R} = \sum (\ln R_i * W_i) / \sum (W_i)$$

که در این رابطه $\ln R$ میانگین وزن‌دهی شده نسبت واکنش، W_i تعداد مشاهدات هر آزمایش، و $\ln R$ نسبت واکنش لگاریتمی می‌باشد. پس از محاسبه انحراف معیار و میانگین وزنی هر آزمایش، حد اطمینان بر اساس انحراف معیار و تعداد مشاهدات در سطح احتمال پنج درصد مشخص شد و معنی‌دار بودن اثر تیمارهای مختلف بر سدیم ریشه و سایر صفات کمی

و کیفی مشخص و با نمودار توسط نرم افزار اکسل ارائه گردید.

نظر به این که تعداد مشاهدات برای هر آزمایش متفاوت بود (جداول ۱ و ۲). نقاطی در نمودارها به عنوان معنی دار بودن عامل مشخص شده که انحراف استاندارد آن‌ها با صفر همپوشانی نداشته باشد (سلطانی و سلطانی ۱۳۹۳).

نتایج و بحث

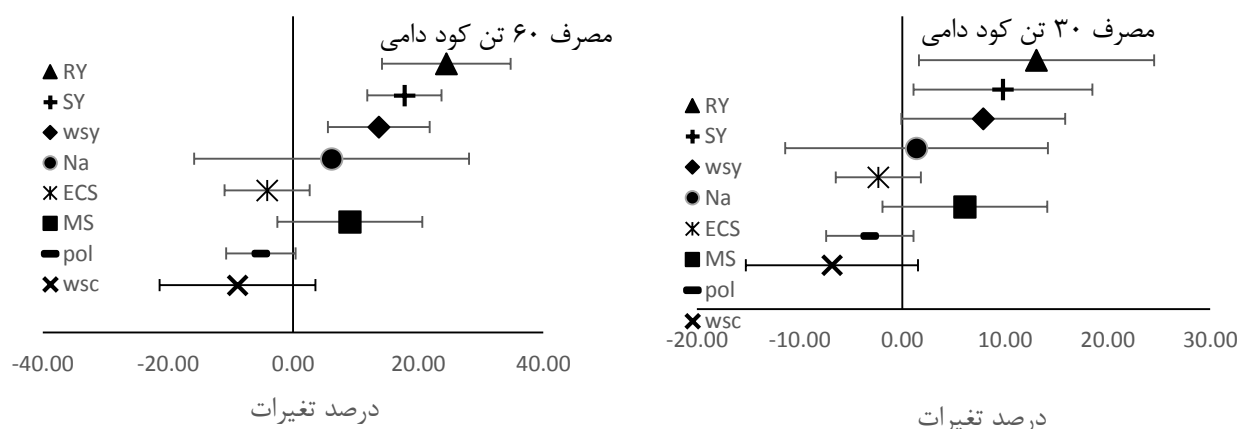
اثر کودهای آلی

با تجزیه بر روی ۱۲ مطالعه موجود در مورد کود دامی (کود گوسفندی پوسیده) مشخص شد مصرف ۳۰ تن در هکتار کود دامی نسبت به عدم مصرف کود باعث افزایش معنی دار عملکرد ریشه و عملکرد قند ناخالص به مقدار ۱۳ و ۱۰ درصد گردید. اما اثر مصرف این کود بر عملکرد قند خالص، سدیم ریشه، قند ملاس، راندمان استحصال و درصد قند خالص و درصد قند ناخالص معنی دار نبود (جدول ۱ و شکل ۱). مصرف ۶۰ تن در هکتار کود دامی باعث افزایش معنی دار عملکرد ریشه، عملکرد قند ناخالص و عملکرد قند خالص به ترتیب به مقدار ۲۵، ۱۸ و ۱۴ درصد نسبت به عدم مصرف کود گردید. اثر مصرف این کود بر سایر صفات ریشه چغندر قند معنی دار نبود (جدول ۱ و شکل ۱). اما مصرف ۳۰ و ۶۰ تن کود دامی به ترتیب باعث افزایش یک و شش درصدی سدیم ریشه و در نتیجه کاهش ۷٪ تا ۹٪ درصد قند خالص گردید که این تغییرات معنی دار نبود. افزایش کود دامی با توجه به تغییر شرایط خاک می تواند بر عملکرد محصول موثر باشد. در یک مطالعه فراتحلیل بر روی ۱۰۱ مطالعه با ۵۹۲ تیمار مشخص شد مصرف کود دامی باعث افزایش معنی دار کربن آلی خاک گردید اما مقدار این افزایش بر اساس روش شخم، عمق خاک، شرایط اقلیمی، اسیدیته، رسی و شنی بودن خاک، منشا کود (دامی در مقابل کود سبز) متفاوت بود (گراس و گلاس، ۲۰۲۱).

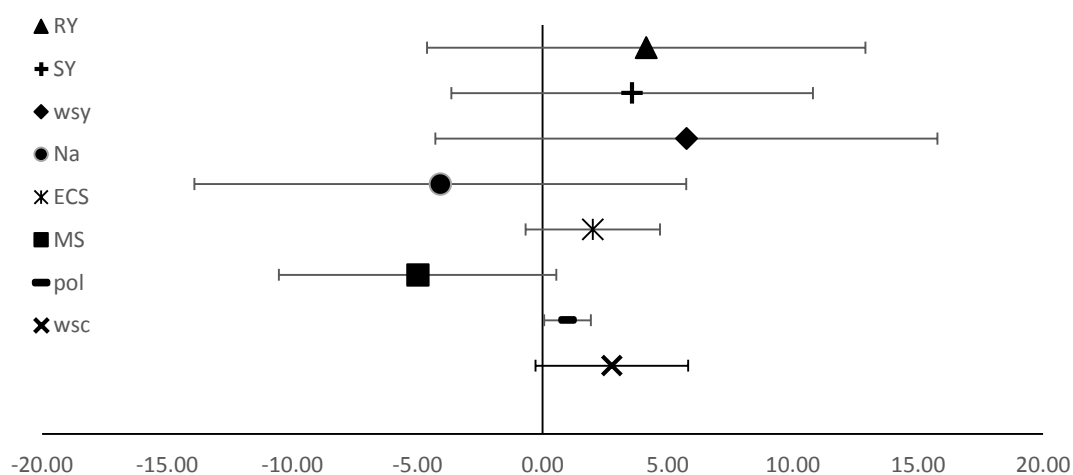
با تجزیه بر روی ۸ مطالعه شامل تلقیح بذر با باکتری پسودوموناس و اسید آمینه هیومی فورته مشخص شد عملکرد ریشه، عملکرد قند ناخالص و عملکرد قند خالص به ترتیب به مقدار چهار، چهار و شش درصد افزایش غیر معنی دار یافت. این در حالی است که این ترکیبات مقدار سدیم و قند ملاس را به ترتیب چهار و پنج درصد کاهش داده که منجر به افزایش راندمان استحصال و درصد قند خالص به ترتیب به مقدار دو و سه درصد گردید، هر چند که اثرات آن معنی دار نبوده است. اثر این فرآورده ها تنها بر افزایش درصد قند خالص به مقدار یک درصد به طور معنی دار موثر بود (جدول ۱ شکل ۲). عدم اثر بخشی یک کود زیستی در شرایط خاص نمی تواند نشانه عدم اثر بخشی آن در سایر شرایط باشد و بیشتر از آن که به ماهیت آن بستگی داشته باشد به کیفیت آن بستگی دارد. مهمترین دلیل که برخی کودها مانند کودهای زیستی مورد اقبال کشاورزان قرار نگرفته اند، اثر بخشی سریع قیمت اندک و برخورداری از توزیع سراسری کودهای شیمیایی در کشور است. حذف یارانه از کلیه کودها یا تخصیص بخشی از آن به کودهای زیستی می تواند موجب افزایش امکان رقابت آن‌ها در بازار شود (اسدی رحمانی و همکاران، ۱۳۹۱).

جدول ۱- نتایج فراتحلیل مصرف کود دامی، فرآورده های باکتری و اسید آمینه، مقادیر مختلف کود نیتروژن بر صفات کمی و کیفی چغندر قند طی ۲۳ سال تحقیقات چغندر قند در نقاط مختلف کشور

تیمار	عملکرد ریشه		عملکرد قند ناخالص		عملکرد قند خالص		سدیم		راندمان استحصال		ملاس		درصد قند ناخالص		درصد قند خالص	
	تعداد	تغییرات (%)	تعداد	تغییرات (%)	تعداد	تغییرات (%)	تعداد	تغییرات (%)	تعداد	تغییرات (%)	تعداد	تغییرات (%)	تعداد	تغییرات (%)	تعداد	تغییرات (%)
۳۰ تن در هکتار کود دامی	42	13.07*	42	9.81*	42	7.89 ^{ns}	42	1.39 ^{ns}	42	-2.32 ^{ns}	42	6.09 ^{ns}	42	-3.17 ^{ns}	42	-6.84 ^{ns}
۶۰ تن در هکتار کود دامی	42	24.46*	42	17.78*	42	13.67*	42	6.14 ^{ns}	42	-4.15 ^{ns}	42	9.06 ^{ns}	42	-5.16 ^{ns}	42	-8.88 ^{ns}
باکتری و اسید آمینه	204	4.14 ^{ns}	204	3.58 ^{ns}	204	5.75 ^{ns}	204	-4.09 ^{ns}	204	2.00 ^{ns}	204	-4.99 ^{ns}	204	1.00*	204	2.77 ^{ns}
50 kg/ha	424	10.23*	424	9.09*	424	8.68*	424	5.98*	424	-0.9 ^{ns}	360	3.17*	424	-0.79 ^{ns}	424	-2.4 ^{ns}
50-100 kg/ha	481	14.16*	481	12.08*	481	10.08*	463	7.97*	454	-1.66*	431	3.31*	481	-1.49*	481	-3.34*
100-150 kg/ha	440	15.5*	440	13.38*	440	8.21 ^{ns}	398	8.64*	440	-3.69*	326	6.79*	440	-1.58 ^{ns}	440	-5.42*
150-200 kg/ha	265	22.9*	265	20.51*	265	18.98*	205	5.06 ^{ns}	238	-1.53*	133	2.12 ^{ns}	265	-1.23*	265	-2.85*
200-250 kg/ha	194	24.39*	194	23.21*	194	17.65*	134	3.38 ^{ns}	194	-4.28*	62	6.39*	194	-1.08 ^{ns}	194	-5.25*
250-300 kg/ha	153	9.38 ^{ns}	153	5.24 ^{ns}	153	0.8 ^{ns}	153	17.86*	126	-4.09*	81	8.7*	153	-3.29*	153	-6.76*



شکل ۱- درصد تغییرات صفات مختلف چغندر قند شامل عملکرد ریشه (RY)، عملکرد قند ناخالص (SY)، عملکرد قند خالص (WSY)، مقدار سدیم (NA)، راندمان استحصال (ECS)، قند ملاس (MS)، درصد قند ناخالص (pol) درصد قند خالص (WSC) در مصرف ۳۰ تن (سمت راست) و ۶۰ تن (سمت چپ) در هکتار کود دامی نسبت به عدم مصرف آن



شکل ۲- درصد تغییرات صفات مختلف چغندر قند شامل عملکرد ریشه (RY)، عملکرد قند ناخالص (SY)، عملکرد قند خالص (WSY)، مقدار سدیم (NA)، راندمان استحصال (ECS)، قند ملاس (MS)، درصد قند ناخالص (pol) درصد قند خالص (WSC) در مصرف باکتری و اسید آمینه نسبت به عدم مصرف کود

مقدار نیتروژن

با توجه به تنوع تیمارهای موجود در مقدار نیتروژن مصرفی، این تیمارها به شش گروه تقسیم شد و هر گروه نسبت به عدم مصرف نیتروژن به عنوان شاهد مورد بررسی قرار گرفت. مقدار موجودی نیترات خاک در تیمارهای شاهد کمتر از ۱۵ میلی گرم در کیلوگرم بود.

از مجموع ۴۸۰ مطالعه موجود در مورد کود نیتروژن، بررسی و تجزیه بر روی ۱۳۸ مطالعه صورت گرفت. مصرف نیتروژن تا ۵۰ کیلوگرم در هکتار نسبت به عدم مصرف آن باعث افزایش معنی دار عملکرد ریشه، عملکرد قند ناخالص و عملکرد قند خالص به ترتیب به مقدار ۱۰، نه و نه درصد شد این در حالی است که مقدار سدیم و قند ملاس ریشه نیز به ترتیب به مقدار شش و سه درصد افزایش معنی دار یافت. اثر این مقدار مصرف نیتروژن نسبت به شاهد باعث تغییرات معنی دار درصد قند ناخالص و درصد قند خالص نشد (جدول ۱ شکل ۳).

مصرف ۵۰ تا ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار باعث افزایش معنی دار مقدار عملکرد ریشه، عملکرد قند ناخالص و عملکرد قند خالص به ترتیب به مقدار ۱۴، ۱۲ و ۱۰ درصد نسبت به شاهد عدم مصرف نیتروژن گردید. مقادیر سدیم ریشه و درصد قند ملاس نیز در اثر مصرف این مقدار نیتروژن به ترتیب هشت و سه درصد افزایش معنی دار داشت. این در حالی است که راندمان استحصال کاهش و در نتیجه مقدار درصد قند ناخالص و درصد قند خالص به ترتیب حدود یک و سه درصد به طور معنی دار کاهش یافت (جدول ۱، شکل ۳).

مصرف ۱۰۰ تا ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار باعث افزایش معنی دار عملکرد ریشه و عملکرد قند ناخالص به مقدار ۱۶ و ۱۳ درصد نسبت به شاهد عدم مصرف نیتروژن گردید. مصرف این مقدار نیتروژن بر عملکرد قند خالص بی تاثیر بود. اما مقدار سدیم و قند ملاس به مقدار نه و هشت درصد به طور معنی دار افزایش یافت که منجر به کاهش معنی

دار راندمان استحصال به مقدار چهار درصد گردید و در نتیجه درصد قند خالص به مقدار پنج درصد به طور معنی دار کاهش یافت (جدول ۱، شکل ۳).

مصرف ۱۵۰ تا ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن نسبت به عدم مصرف این کود باعث افزایش معنی دار عملکرد ریشه، عملکرد قند ناخالص و عملکرد قند خالص به ترتیب به مقدار ۲۳، ۲۰ و ۱۹ درصد گردید. این در حالی است که افزایش سدیم و قند ملاس ریشه به ترتیب به مقدار پنج و دو درصد بود. این امر نشان می دهد مصرف این سطح از نیتروژن ضمن افزایش قابل توجه اجزا عملکردی، مقدار سدیم و ناخالصی های دیگر ریشه را به طور معنی دار افزایش نداد و حتی درصد تغییرات این صفات کمتر از مقدار مصرف ۱۵۰-۱۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن بود. راندمان استحصال در این سطح کودی دو درصد و درصد قند ناخالص و درصد قند خالص نیز به ترتیب به مقدار یک و سه درصد به طور معنی دار کاهش یافت (جدول ۱، شکل ۳) که این کاهش کمتر از سطح کودی ۱۵۰-۱۰۰ کیلوگرم در هکتار بود. لذا در بین تیمارهای کودی این سطح مصرف نیتروژن می تواند برای چغندر قند مناسب تر باشد.

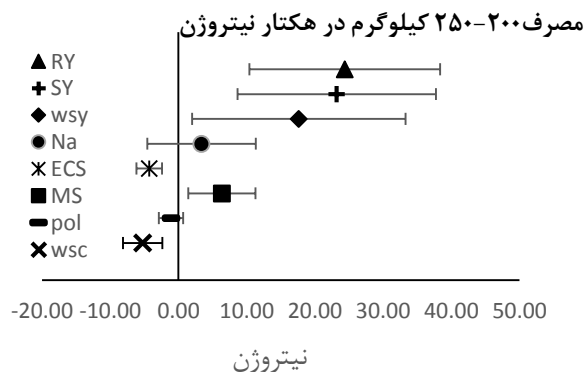
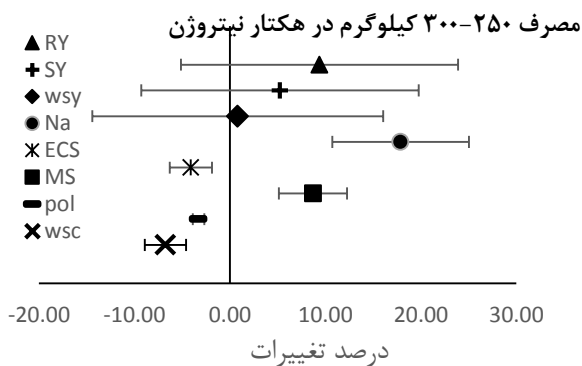
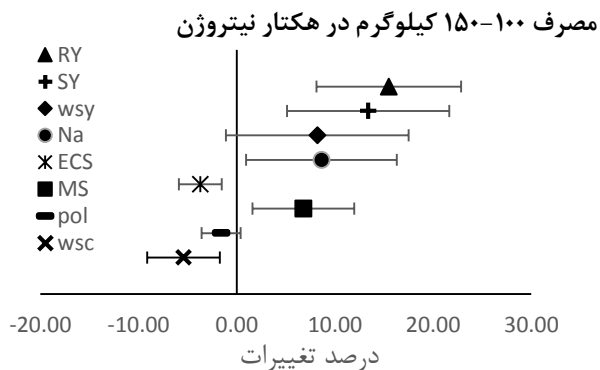
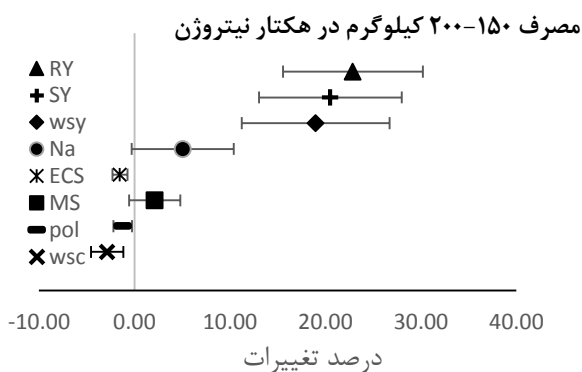
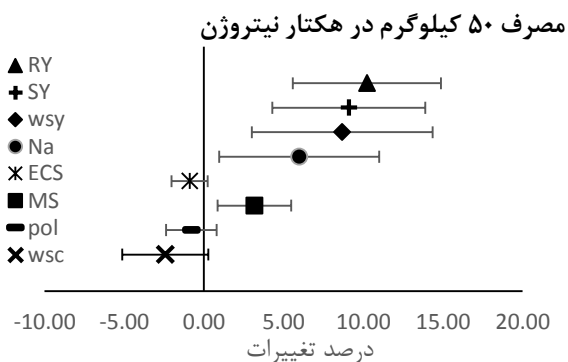
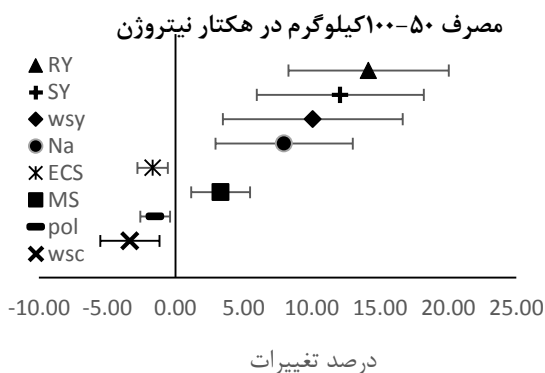
مصرف ۲۰۰ تا ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن نسبت به عدم مصرف این کود باعث افزایش معنی دار عملکرد ریشه، عملکرد قند ناخالص و عملکرد قند خالص به ترتیب به مقدار ۲۴، ۲۳ و ۱۸ درصد گردید. مقدار افزایش سدیم ریشه حدود سه درصد و کمتر از تیمار قبلی بود که این افزایش نیز معنی دار نبود. اما درصد قند ملاس به طور معنی دار به مقدار شش درصد افزایش یافت که این امر منجر به کاهش معنی دار راندمان استحصال به مقدار چهار درصد گردید. از طرفی درصد قند خالص نیز به مقدار پنج درصد به طور معنی دار کاهش یافت (جدول ۱، شکل ۳). این نتایج نشان می دهد مصرف ۲۵۰-۲۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن با وجودی که مقدار عملکرد ریشه و عملکرد قند ناخالص را نسبت به مصرف ۲۰۰-۱۵۰ کیلوگرم کود کمی افزایش داد

(۲۴ و ۲۳ درصد در مقابل ۲۳ و ۲۰ درصد) اما به علت افزایش معنی دار درصد قند ملاس و کاهش راندمان استحصال منجر به کاهش بیشتر درصد قند خالص نسبت به تیمار ۱۵۰-۲۰۰ کیلوگرم در هکتار (۵ درصد کاهش در مقابل ۳ درصد) گردید. این نتایج مجدداً نشان می‌دهد تیمار ۱۵۰-۲۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن می‌تواند تیمار مناسب تری باشد.

مصرف ۲۵۰ تا ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن نسبت به عدم مصرف کود باعث افزایش غیر معنی دار عملکرد ریشه، عملکرد قند ناخالص و عملکرد قند خالص شد. این مقدار افزایش نسبت به سطح کودی ۱۵۰-۲۰۰ کیلوگرم در هکتار مقدار افزایش عملکرد کمتری داشت (نه، پنج و یک درصد در مقابل ۲۴، ۲۳ و ۱۸ درصد). این در حالی بود که مقدار سدیم ریشه و درصد قند ملاس به طور معنی دار و چشمگیری به ترتیب به مقدار ۱۸ و ۹ درصد افزایش یافت. همچنین راندمان استحصال، درصد قند ناخالص و درصد قند خالص به طور معنی دار به ترتیب به مقدار چهار، سه و هفت درصد کاهش یافت (جدول ۱ و شکل ۳). همانگونه که افزایش سدیم و قند ملاس در این سطح کودی بیشترین مقدار بود، درصد قند خالص نیز در این تیمار بیشترین کاهش را نشان داد. این امر نشان می‌دهد مصرف بی رویه کود نه تنها باعث افزایش قابل توجه در عملکرد نشد بلکه با افزایش

شدید ناخالصی های ریشه عملکرد و درصد قند ناخالص و درصد قند خالص به شدت کاهش یافت.

در مجموع مصرف ۱۵۰-۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار در بین تیمارهای مختلف بهترین تیمار بود زیرا ضمن افزایش معنی دار عملکرد ریشه، عملکرد قند ناخالص و عملکرد قند خالص، راندمان استحصال و درصد قند بیشتری نسبت به دیگر تیمارها داشت. مصرف این مقدار نیتروژن باعث می‌شود در طی دوره رشد گیاه، نیتروژن به خوبی معدنی شده و در اختیار گیاه قرار گیرد (وارگاو همکاران، ۲۰۲۲). مصرف بیش از حد نیتروژن باعث افزایش میزان یون های نیتروژن خاک در اواخر فصل رشد می‌شود. گیاه ضمن جذب نیتروژن و افزایش آلفا آمینو نیتروژن ریشه به منظور حفظ تبادل کاتیون و آنیون نسبت به جذب سدیم تمایل بیشتری نشان داده و در نتیجه با افزایش جذب سدیم کیفیت ریشه چغندر قند کاهش می‌یابد. به عبارتی نیتروژن اضافه کیفیت چغندر قند را با کاهش غلظت شکر و افزایش مقدار ناخالصی ها، کاهش داده و از این لحاظ مدیریت بهینه نیتروژن در بهبود و تولید محصول چغندر قند بسیار مهم است (لمب و همکاران، ۲۰۱۱). مصرف زیاد کود علاوه بر این که کیفیت ریشه را کاهش داده و تولید شکر صرفه اقتصادی نخواهد داشت بلکه باعث آلودگی آب های سطحی و زیر زمینی نیز می‌شود (مارچتی و کاستلی، ۲۰۱۱).



شکل ۳- درصد تغییرات صفات مختلف چغندر قند شامل عملکرد ریشه (RY)، عملکرد قند ناخالص (SY)، عملکرد قند خالص (WSY)، مقدار سدیم (NA)، راندمان استحصال (ECS)، قند ملاس (MS)، درصد قند ناخالص (pol) درصد قند خالص (WSC) در مصرف سطوح مختلف نیتروژن نسبت به عدم مصرف کود

جدول ۲- اثر روش های مختلف تقسیط نیتروژن بر صفات کمی و کیفی چغندر قند طی ۲۳ سال تحقیقات چغندر قند در نقاط مختلف کشور

تیمار	عملکرد ریشه		عملکرد قند ناخالص		عملکرد قند خالص		سدیم		راندمان استحصال		ملاس		درصد قند ناخالص		درصد قند خالص	
	تعداد	تغییرات (%)	تعداد	تغییرات (%)	تعداد	تغییرات (%)	تعداد	تغییرات (%)	تعداد	تغییرات (%)	تعداد	تغییرات (%)	تعداد	تغییرات (%)	تعداد	تغییرات (%)
۱۰۰٪ مصرف نیتروژن بعد از تنک	96	-1.23 ^{ns}	96	0.47 ^{ns}	96	-.39 ^{ns}	96	4.86 ^{ns}	96	-0.19 ^{ns}	96	0.64 ^{ns}	96	0.65 ^{ns}	96	-0.65 ^{ns}
۵۰٪ مصرف نیتروژن در تنک اول و ۵۰٪ مصرف در تنک دوم	48	-3.29 ^{ns}	48	-6.23 ^{ns}	48	-7.91 ^{ns}	48	7.49*	48	-2.27 ^{ns}	48	2.59 ^{ns}	48	-4.11 ^{ns}	48	-6.04 ^{ns}
۲۵٪ قبل کاشت، ۵۰٪ در تنک اول و ۲۵٪ در تنک دوم	48	4.46*	48	4.90*	48	2.92 ^{ns}	48	-5.66 ^{ns}	48	0.88*	48	-3.02 ^{ns}	48	-.79 ^{ns}	48	-2.83 ^{ns}
۳۰٪ قبل کاشت، ۳۰٪ در تنک اول و ۳۰٪ در تنک دوم	112	-2.52 ^{ns}	112	-1.53 ^{ns}	112	-4.02 ^{ns}	112	2.63 ^{ns}	112	-.48 ^{ns}	112	0.59 ^{ns}	112	-.48 ^{ns}	112	-2.77 ^{ns}
۷۵٪ قبل کاشت، ۲۵٪ در تنک اول	64	0.9 ^{ns}	64	-4.18 ^{ns}	64	-7.13*	64	0.99 ^{ns}	64	-1.48 ^{ns}	64	2.38 ^{ns}	64	-1.49 ^{ns}	64	-3.0 ^{ns}

تقسیم نیتروژن

با تجزیه بر روی ۳۷ مطالعه از مجموع ۴۸۰ مطالعه موجود در مورد مصرف کود مشخص شد مصرف ۱۰۰ درصد نیتروژن در زمان بعد از تنک و وجین در مقایسه با تیمار شاهد ۵۰ درصد کود در زمان قبل از کاشت و ۵۰ درصد در زمان تنک و وجین مصرف شد، اثر معنی‌دار بر صفات مختلف چغندر قند نداشت. در این شرایط میزان سدیم حدود پنج درصد افزایش و عملکرد ریشه حدود یک درصد کاهش یافت (جدول ۲ و شکل ۴).

مصرف ۵۰ درصد کود در زمان تنک اول و ۵۰ درصد در زمان تنک دوم باعث افزایش معنی‌دار سدیم ریشه به مقدار ۷/۵ درصد گردید. اثر این روش مصرف نیتروژن بر سایر صفات نسبت به شاهد ۵۰ درصد کود در زمان قبل از کاشت و ۵۰ درصد در زمان تنک و وجین معنی‌دار نبود (جدول ۲ و شکل ۴).

مصرف ۲۵ درصد نیتروژن قبل از کاشت، ۵۰ درصد در زمان تنک اول و ۲۵ درصد در زمان تنک دوم نسبت به شاهد "۵۰ درصد قبل از کاشت و ۵۰ درصد بعد از تنک اول" باعث افزایش معنی‌دار عملکرد ریشه و عملکرد قند ناخالص به ترتیب به مقدار ۴/۵ و ۵ درصد گردید. راندمان استحصال نیز حدود یک درصد به طور معنی‌دار افزایش یافت. با وجودی که سایر صفات مورد بررسی و مقدار سدیم ریشه به طور معنی‌دار تحت تاثیر این تیمار نبود اما مقدار سدیم ریشه حدود شش درصد کاهش یافت که این امر در افزایش راندمان استحصال می‌تواند موثر باشد (جدول ۲، شکل ۴) لذا به نظر می‌رسد این روش اعمال کود از دو روش تقسیم فوق بهتر باشد.

تقسیم ۳۰ درصد کود در زمان کاشت، ۳۰ درصد در زمان تنک اول و ۳۰ درصد در زمان تنک دوم نسبت به شاهد "۵۰ درصد قبل از کاشت و ۵۰ درصد بعد از تنک اول" باعث کاهش معنی‌دار صفات عملکردی و افزایش مقدار سدیم ریشه به مقدار حدود سه درصد گردید. این تقسیم

نسبت به تقسیم ۲۵-۵۰-۲۵ سدیم ریشه چغندر قند را بیشتر افزایش داد (جدول ۲، شکل ۴).

مصرف قسمت اعظم کود قبل از کاشت (۷۵ درصد قبل از کاشت) و یک سوم در زمان تنک نسبت به شاهد "مصرف ۵۰ درصد قبل از کاشت و ۵۰ درصد در زمان تنک" اثر معنی‌داری بر صفات مورد مطالعه نداشت. از طرفی مقدار عملکرد قند ناخالص و عملکرد قند خالص کاهش یافت (جدول ۲، شکل ۴).

لذا در بین تیمارهای مختلف تقسیم کود به نظر می‌رسد مصرف بیشتر نیتروژن قبل از کاشت و تخصیص مقدار زیاد آن بعد از تنک دوم مناسب نبوده و تیمار شاهد ۵۰ درصد قبل از کاشت و ۵۰ درصد بعد از تنک اول تیمار مناسب بوده تقسیم ۲۵ درصد قبل از کاشت و ۵۰ درصد در زمان تنک اول و ۲۵ درصد در زمان تنک دوم نیز به علت کاهش سدیم و افزایش عملکرد ریشه و عملکرد قند ناخالص تیمار مناسب تقسیم نیتروژن می‌باشد.

تقسیم نیتروژن بسته به شرایط خاک از لحاظ بافت، ماده آلی (میدلبرگ، ۲۰۰۸)، و موجودی نیتروژن خاک در زمان کاشت (لمب و مورگان، ۱۹۹۳) اثرات متفاوتی دارد و اگر شرایط به گونه‌ای باشد که در زمان نامناسب بخصوص پس از کامل شدن رشد برگ و ریشه چغندر قند، نیتروژن بیش از حد در اختیار گیاه قرار گیرد و گیاه مجبور به جذب بیش از حد گردد، توازن یونی ریشه به هم خورده و جهت حفظ تعادل، گیاه اقدام به جذب سدیم می‌نماید. به عبارتی میزان نیتروژن مضره و سدیم ریشه چغندر قند در مصرف تاخیری کود نیتروژن افزایش می‌یابد (یوسف آبادی و مظاهری، ۱۳۷۹) لذا با افزایش جذب سدیم ریشه، شاخص‌های کیفیت ریشه چغندر قند کاهش می‌یابد.

در مجموع نتایج این پژوهش در زمینه تاثیر کود دامی، مقدار نیتروژن و زمان مصرف نیتروژن بر صفات عملکرد ریشه، عملکرد قند ناخالص، عملکرد قند خالص و مقدار سدیم ریشه نشان داد:

درصد شد همچنین مصرف عمده کود بعد از تنک و وجین منجر به افزایش هفت درصدی سدیم ریشه گردید. این در حالی است مصرف ۲۵ درصد کود نیتروژن قبل از کاشت، ۵۰ درصد در زمان تنک اول و ۲۵ درصد در زمان تنک دوم نسبت به مصرف ۵۰ درصد قبل از کاشت و ۵۰ درصد در زمان تنک اول منجر به کاهش پنج درصدی و معنی دار سدیم ریشه گردید.

سدیم در فعالیت کانال های انتقال دهنده غشا پلاسمایی ریشه مثل کانال انتخابی یون پتاسیم دخالت دارد و نیز تجمع سدیم کاهش رشد ریشه را در پی دارد لذا در جذب آب و برخی عناصر همانند فسفر، آهن و روی که عناصر محدود کننده رشد هستند، خلل ایجاد می شود (پرویز و ستاواتی، ۲۰۰۸). تجمع بهتر قند در ریشه و در نتیجه عملکرد بهتر قند با جذب بیشتر پتاسیم و آلفا آمینو نیتروژن به جای سدیم مقدور خواهد بود (تسیلتاس و ماسلاریس، ۲۰۰۹).

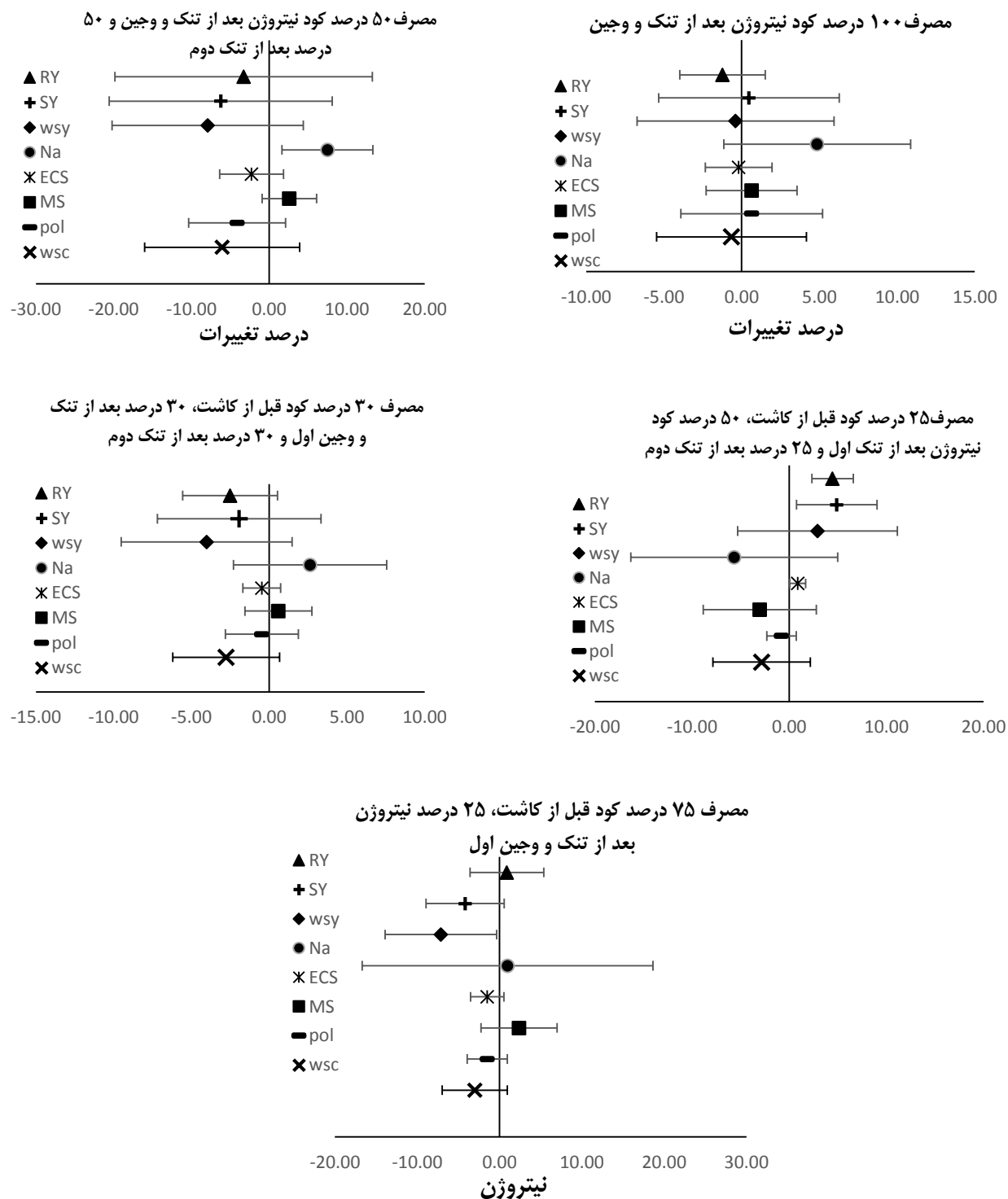
اثر مدیریت خاک بر سدیم ریشه بسیار حائز اهمیت است. به طوری که مشاهده شده است خاک های رسی با نفوذ کم، مصرف زیاد و دیر هنگام کودهای نیتروژن، مصرف کود دامی غیر پوسیده، مصرف زیاد آب و آبیاری غرقابی مهمترین عوامل مدیریتی در افزایش سدیم ریشه چغندر قند شناخته شده اند. در مجموع هر عاملی که باعث کاهش تهویه خاک گردیده و یا در جذب بهینه عناصر غذایی توسط گیاه چغندر قند خلل ایجاد کند، باعث افزایش سدیم ریشه و کاهش کیفیت و ضریب استحصال قند از ریشه چغندر قند خواهند شد. این امر نشان می دهد عوامل مختلفی در افزایش میزان سدیم ریشه و در نتیجه کاهش درصد قند و کیفیت چغندر قند موثر هستند (نوشاد و خیامیم، ۱۳۹۶).

۱) در بین اثر عوامل مختلف بر عملکرد ریشه چغندر قند، مصرف کود دامی به مقدار ۳۰ و ۶۰ تن در هکتار باعث افزایش معنی دار عملکرد ریشه به مقدار ۱۳ و ۲۵ درصد گردید. مصرف مقدار نیتروژن بیش از ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار، عملکرد ریشه را به طور معنی دار افزایش نداد در حالی که مصرف کود نیتروژن تا ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار باعث افزایش معنی دار ۲۴-۱۰ درصدی عملکرد ریشه گردید. مصرف ۲۵ درصد کود قبل از کاشت، ۵۰ درصد در زمان تنک اول و ۲۵ درصد در زمان تنک دوم باعث افزایش پنج درصدی عملکرد ریشه در مقایسه با مصرف ۵۰ درصد کود در قبل از کاشت و ۵۰ درصد در زمان تنک گردید.

۲) در خصوص عملکرد قند ناخالص نیز مشاهده می شود مصرف ۳۰ و ۶۰ تن کود دامی مقدار عملکرد را به ترتیب ۱۰ و ۱۸ درصد به طور معنی دار افزایش داد. مصرف نیتروژن بیش از ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار و مصرف عمده کود قبل یا بعد از تنک اول اثر معنی دار بر این صفت نداشت. مصرف کود نیتروژن تا ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار، مقدار عملکرد قند ناخالص را ۲۳-۱۰ درصد و تقسیط ۲۵-۵۰-۲۵ نیتروژن مقدار عملکرد قند ناخالص را به مقدار پنج درصد به طور معنی دار افزایش داد. و مصرف تمام کود بعد از کاشت این صفت را حدود شش درصد کاهش داد.

۳) عملکرد قند خالص تحت تاثیر مصرف ۳۰ تن در هکتار کود دامی و روش های مختلف تقسیط قرار نگرفت. افزایش عملکرد قند خالص در مصرف ۶۰ تن کود دامی ۱۴ درصد، مصرف ۲۵۰-۵۰ کیلوگرم در هکتار ۱۹-۸ درصد افزایش یافت. مصرف عمده کود قبل از کاشت مقدار عملکرد قند خالص را حدود هفت درصد کاهش داد.

۴) افزایش مصرف کود نیتروژن به مقدار ۳۰۰-۲۵۰ کیلوگرم در هکتار منجر به افزایش معنی دار سدیم ریشه به مقدار ۱۸



شکل ۴- درصد تغییرات صفات مختلف چغندر قند شامل عملکرد ریشه (RY)، عملکرد قند ناخالص (SY)، عملکرد قند خالص (WSY)، مقدار سدیم (NA)، راندمان استحصال (ECS)، قند ملاس (MS)، درصد قند ناخالص (pol) درصد قند خالص (WSC) در تیمارهای مختلف تقسیط نیتروژن نسبت به تیمار شاهد مصرف ۵۰ درصد کود قبل از کاشت و ۵۰ درصد در زمان تنک اول

نتیجه گیری

زیاد بودن مقدار سدیم ریشه و در نتیجه کاهش راندمان استحصال و کاهش عملکرد قند خالص از معضلات بزرگ چغندرکاران در سطح کشور است. در این راستا اثر تیمارهای مختلف کود نیتروژن و کود آلی بر میزان سدیم و صفات کمی و کیفی ریشه چغندر قند به روش فراتحلیل بررسی گردید.

مصرف فرآورده های باکتری و اسیدهای آمینه اثر معنی دار بر افزایش عملکرد ریشه، عملکرد قند خالص و ناخالص نداشت. تنها اثر معنی دار این فرآورده ها بر مقدار درصد قند ناخالص بود که این صفت را به مقدار یک درصد افزایش داد. لذا به نظر می رسد مصرف این فرآورده ها نیاز به مطالعه بیشتر با تاکید بر کیفیت این فرآورده ها و بررسی اقتصادی موضوع دارد.

مصرف ۳۰ تن کود دامی در هکتار باعث افزایش معنی دار عملکرد ریشه و عملکرد قند ناخالص به ترتیب به مقدار ۱۳ و ۱۰ درصد و مصرف ۶۰ تن کود دامی در هکتار باعث افزایش عملکرد ریشه، عملکرد قند ناخالص و عملکرد قند خالص به ترتیب به مقدار ۲۵، ۱۸ و ۱۴ درصد گردید. با مصرف ۶۰ تن در هکتار کود دامی مقدار سدیم ریشه حدود شش درصد به طور غیر معنی دار افزایش یافت. لذا بر اساس نتایج بدست آمده در این پژوهش مصرف ۶۰ تن در هکتار کود دامی در زراعت چغندر قند قابل توصیه است. در مصرف کود دامی کیفیت و ماده خشک آن (ماهارجان و هرگرت، ۲۰۱۹) مهم بوده و مصرف مستقیم کود دامی در زراعت چغندر قند توصیه نمی شود (هرگرت، ۲۰۱۲). مصرف کود دامی باید برای گیاه سال قبل (عمدتا گندم) در تناوب با چغندر قند، صورت پذیرد. در آزمایشات مورد تحلیل نیز روش مصرف به صورت فوق الذکر بود.

مصرف نیتروژن به مقدار ۱۵۰ تا ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار باعث افزایش معنی دار عملکرد ریشه، عملکرد قند ناخالص و عملکرد قند خالص به ترتیب به مقدار ۲۳، ۲۱، و ۱۹ درصد

نسبت به شاهد (عدم مصرف کود) گردید. عملکرد ریشه و عملکرد قند ناخالص با مصرف ۲۵۰-۲۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن بیشتر از تیمار ۲۰۰-۱۵۰ کیلوگرم در هکتار بود اما این سطح نیتروژن (۲۵۰-۲۰۰) باعث کاهش راندمان استحصال، درصد قند خالص و عملکرد قند خالص نسبت به تیمار ۲۰۰-۱۵۰ کیلوگرم در هکتار شد. مصرف بیش از حد نیتروژن به مقدار ۲۵۰-۳۰۰ کیلوگرم در هکتار نیز اثر معنی دار بر افزایش عملکرد ریشه، قند خالص و ناخالص نداشت و مصرف بیشتر کود باعث افزایش بیشتر سدیم (۱۸ درصد) و قند ملاس ریشه و کاهش راندمان استحصال، درصد قند خالص و درصد قند ناخالص شد. لذا نتایج مطالعه فراتحلیل بر روی داده های موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندر قند طی ۲۳ سال نشان می دهد مصرف مقدار زیاد نیتروژن نه تنها باعث افزایش معنی دار عملکرد ریشه و قند نمی شود بلکه افزایش سدیم ریشه و کاهش کیفیت ریشه را در پی دارد. از طرفی مصرف زیاد کود باعث آلودگی های زیست محیطی خواهد شد لذا بر اساس نیتروژن موجود در خاک مصرف ۱۵۰ تا ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار برای چغندر قند قابل توصیه می باشد.

مصرف عمده کود بعد از کاشت و یا مصرف زیاد کود قبل از کاشت و عدم تقسیط مناسب مصرف نیتروژن، بر اجزا عملکرد ریشه چغندر قند تاثیر معنی دار نداشت. تقسیط با تاخیر نیتروژن باعث افزایش سدیم (حدود ۷/۵ درصد) و ناخالصی های ریشه شد. لذا تقسیط کود نیتروژن به طوری که ۲۵٪ قبل از کاشت، ۵۰٪ در زمان تنک اول و ۲۵٪ در زمان تنک دوم منجر به افزایش عملکرد ریشه و عملکرد قند ناخالص به ترتیب به مقدار ۴/۵ و ۴/۹ درصد نسبت به مصرف ۵۰ درصد قبل از کاشت و ۵۰ درصد در زمان تنک اول گردید. این تیمار راندمان استحصال را نیز حدود یک درصد افزایش داد. با وجودی که مصرف ۲۵٪ نیتروژن قبل از کاشت، ۵۰ درصد در زمان تنک و ۲۵٪ در زمان تنک دوم بهترین تیمار تقسیط کودی است اما در بسیاری مناطق ممکن است تنک

تشکر و قدردانی

اجرای پروژه با حمایت موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندر قند انجام شده است. موضوع فراتحلیل توسط مطالب فراگرفته شده در کارگاه آموزشی که بدین منظور با تدریس آقای دکتر الیاس سلطانی عضو هیات علمی دانشگاه تهران برگزار شد، مورد توجه قرار گرفت بدین وسیله از ایشان کمال تشکر را دارد.

دوم انجام نشود و یا به علت کاهش تردد ادوات در زمین همان تیمار ۵۰٪ کود قبل از کاشت و ۵۰٪ در زمان تنک اول بهترین خواهد بود و مصرف کل کود بعد از کاشت اصلاً قابل توصیه نیست.

فهرست منابع

۱. اسدی رحمانی ه، خاوازی ک، اصغرزاده ا، رجالی ف، افشاری م. ۱۳۹۱. کودهای زیستی در ایران: فرصت‌ها و چالش‌ها. مجله پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب). الف/ جلد ۲۶ (۱): ۷۷-۸۷.
۲. سلطانی ا و ا. سلطانی. ۱۳۹۳. لزوم استفاده از فرا تحلیل (متا آنالیز) در پژوهشهای علوم زراعی. نشریه تولید گیاهان زراعی. ۷(۳): ۲۰۶-۲۱۳.
۳. عبدالهیان نوقابی، محمد. ۱۳۸۳. بررسی وضعیت نا خالصی‌های چغندر قند در شرایط اقلیمی ایران. گزارش نهایی. موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندر قند.
۴. مجللی ح. ۱۳۷۳. خاک‌های شور و سدیمی (ترجمه). مرکز نشر دانشگاهی. ۳۶۰ صفحه.
۵. نوشاد ح، بابایی ب، شیخ الاسلامی ر، اوراضی زاده م ر. ۱۳۸۵. تاثیر عوامل سال و آب ماندگی بر میزان جذب سدیم ریشه چغندر قند. بیست و هشتمین سمینار سالانه کارخانجات قند و شکر ایران، مشهد.
۶. نوشاد ح، خیامیم س. ۱۳۹۶. مدیریت خاک در کنترل سدیم ریشه و افزایش کیفیت چغندر قند. پانزدهمین کنگره علوم خاک ایران ۶ تا ۸ شهریور ۱۳۹۶. اصفهان
۷. یوسف آبادی، و.ا، مظاهری، د. بررسی تاثیر تقسیط نیتروژن و زمان مصرف آن بر روند تغییرات برخی از صفات کیفی چغندر قند. مجله علوم زراعی ایران، ۲(۴): ۱-۹.
8. Draycott AP. 2006. Sugar Beet. Black Well Publishing. 514 pages.
9. Bebbber, D. and Richard V. 2022. A meta-analysis of the effect of organic and mineral fertilizers on soil microbial diversity. Applied Soil Ecology, 175: 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104450>
10. Gross, A. and Glaser B. 2021. Meta-analysis on how manure application changes soil organic carbon storage. Sci Rep 11, 5516. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82739-7>
11. Hergert GW. 2012. Sugar beet nutrient management. NEB Guide. University of Nebraska-Lincoln Extension, Institute of Agriculture and Natural Resources. G1459:3 pages.
12. Jaggard K.W., Qi A, Armstrong MJ. 2009 A meta-analysis of sugarbeet yield responses to nitrogen fertilizer measured in England since 1980. Journal of Agricultural Science 147, 287-301.

13. Lamb, T. A., Moraghan J. T. 1993. Comparison of foliar and pre-plant applied nitrogen fertilizer for sugar beet. *Agron. J.* 85: 290-295.
14. Lamb J.A., Bredehoeft M.W., and Dunsmore C. 2011. Nitrogen management strategies for
15. increasing sugar beet root quality Available at: <http://www.sbreb.org/research/soil/soil11/N>
16. management Lamb.pdf.
17. Linquist, B.A., Liu, L., van Kessel, C., and van Groenigen, K.J. 2013. Enhanced, efficiency nitrogen fertilizers for rice systems: Meta-analysis of yield and nitrogen uptake. *Field Crops Res.*, 154: 246-254.
18. Maharjan, B., Hergert, G.W. 2019. Composted Cattle Manure as a Nitrogen Source for Sugar Beet Production. *Agronomy Journal*, 111: 917-923. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.09.0567>.
19. Marchetti R. and Castelli F. 2011. Mineral nitrogen dynamics in soil during sugar beet and winter
20. wheat crop growth. *European Journal of Agronomy*, 35:13-21
21. Middelburg, M. C. G. 2008. Uptake of nitrogen. In: IRS website (www.irs.nl). (Translated from Dutch to English
22. Osenberg, C.W., Sarnelle, O., Cooper, S.D., and Holt, R.D. 1999. Resolving ecological questions through meta-analysis: goals, metrics, and models. *Ecology*. 80:1105–1117.
23. Parvaiz, A., Satyawati. S. 2008. Salt stress and phyto-biochemical responses of plants- a review. *Plant Soil Environment* 54: 89-99.
24. Rotundo, J.L. and Westgate M.E. 2009. Meta-analysis of environmental effects on soybean seed composition. *Field Crops Research* 110: 147-156.
25. Sadeghi-Shoae, M, Taleghani D. F and Paknejad F. 2015. Meta-analysis the effect of nitrogen fertilizer on quantitative and qualitative characteristics of sugar beet. *Biological Forum (Special Issue 2015)*. 7(2): 65-71.
26. Stouffer S.A. A study of attitudes. 1949. *Scientific American Journal*:14(5):11–15. doi: 10.1038/scientificamerican0549-11.
27. Varga, I.; Jović, J.; Rastija, M.; Markulj Kulundžić, A.; Zebec, V.; Lončarić, Z.; Iljkić, D.; Antunović, M. Efficiency and Management of Nitrogen Fertilization in Sugar Beet as Spring Crop: A Review. 2022. *Nitrogen*, 3, 170-185. <https://doi.org/10.3390/nitrogen3020013>
28. Tsialtas J., T., Maslaris N. 2009. Selective absorption of K over Na in sugar beet cultivars and its relationship with yield and quality in two contrasting environments of central Greece. *J Agron Crop Sci* 195 (5): 384-392.
29. Valkama, E., Risto, U., Ylivainio, K., Virkajarvi, P., and Turtola, E. 2009. Phosphorus fertilization: A meta-analysis of 80 years of research in Finland. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 130: 75-85



بررسی برخی از ویژگی‌های شیمیایی، مورفولوژیکی و خطرات آلودگی فلزات سنگین در

لجن فاضلاب و بیوپار آن در دماهای مختلف

فروغ خائفی*، علیرضا حسینی پور و حمیدرضا متقیان

دکتری گروه علوم خاک، دانشگاه شهرکرد؛ khaefif@yahoo.com

استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد؛ hosseinpur-a@agr.sku.ac.ir

دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد؛ motaghian.h@yahoo.com

«مقاله پژوهشی»

دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱ و پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۱

چکیده

گرماکافت به عنوان یک فن‌آوری اقتصادی و سازگار با محیط زیست برای تسهیل بازیافت و کاهش خطر زیست محیطی لجن فاضلاب حائز اهمیت است. هدف از این پژوهش مطالعه تغییرات ساختار، سطح ویژه و منافذ بیوپار، خصوصیات شیمیایی و ارزیابی خطر آلودگی فلزات سنگین روی و سرب در اثر گرماکافت لجن فاضلاب بود. بیوپار لجن فاضلاب به مدت ۲ ساعت در شرایط محدود اکسیژن در دماهای ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ درجه سلسیوس تهیه شدند. سطح ویژه و بررسی منافذ با استفاده از ایزوترم جذب N_2 ، معادله BET و تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تعیین شدند. خطر آلودگی فلزات سرب و روی با استفاده از روش جزءبندی BCR و فاکتورهای آلودگی ارزیابی شد. نتایج نشان داد سطح ویژه بیوپار تحت تأثیر دماهای ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۲/۶۵، ۳/۶۵، ۸/۳۸، ۵/۵۷ برابر لجن بود. با مقایسه حجم کل و میانگین قطر منافذ، بیوپار تخلخل بیشتری نسبت به لجن فاضلاب داشت. عمده منافذ موجود در بیوپارها از نوع مزو (۸/۳۴-۱۹/۹۸ نانومتر) بود. ساختار مورفولوژیکی لجن فاضلاب صاف و نامنظم و بیوپارها دارای سطحی متخلخل و ناهموارتر بودند. حضور ساختارهای آروماتیکی به شکل لانه زنبوری در دماهای بالا به ویژه دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس به وضوح قابل تشخیص بود. خطر زیست محیطی (E_r) برای لجن فاضلاب و بیوپارها در رده کم قرار داشت. با تبدیل لجن به بیوپار، فاکتور آلودگی (Cr) روی و سرب، بیش از ۵۰٪ کاهش یافت. تبدیل لجن به بیوپار سبب افزایش سطح، تخلخل بیشتر و تثبیت کربن به شکل ترکیبات آروماتیکی شد. به دلیل کاهش فاکتور آلودگی فلزات و احتمال خطر زیست محیطی در بیوپارها، از این مواد میتوان به عنوان جاذب یا اصلاح کننده در محیط‌های مختلف استفاده کرد.

کلمات کلیدی: دمای گرماکافت، فاکتور آلودگی روی و سرب، سطح ویژه، خطر زیست محیطی

*آدرس ایمیل نویسنده مسئول: khaefif@yahoo.com



مقدمه

رشد جمعیت، توسعه اقتصادی، شهرنشینی سریع، افزایش استانداردهای بهداشت عمومی و سیستم های بهداشتی بهبود یافته، منجر به ایجاد تعداد زیادی تصفیه خانه فاضلاب در سراسر جهان شده است. در نتیجه، تولید لجن فاضلاب از شبکه های تصفیه خانه به طور مداوم در طول سالهای اخیر افزایش یافته است (یودیانگا و همکاران، ۲۰۱۸). به دلیل وجود عناصر و ترکیبات مضر مانند فلزات سنگین، باکتری-های بیماری زا، ویروس ها، ترکیبات آلی سمی در لجن که می تواند مسمومیت حاد و مزمن را برای محیط زیست و سلامت انسان ایجاد کند، مقررات سختگیرانه ای برای محدود کردن استفاده مستقیم از لجن فاضلاب در دنیا اعمال شده است (لو و همکاران، ۲۰۱۶). در حال حاضر، گزینه های موجود برای دفع لجن شامل محل های دفن زباله (۱۴٪)، سوزاندن (۲۷٪)، برنامه های کشاورزی (۴۲٪) و سایر بخش های صنعتی (۱۷٪) مانند بازیافت انرژی، مواد جاذب و غیره می باشد (سینق و همکاران، ۲۰۲۰). گرماکافت یک رویکرد امیدوار کننده در مدیریت لجن فاضلاب است. گرماکافت، تجزیه حرارتی لجن فاضلاب در شرایط محدود یا فاقد اکسیژن است که حجم لجن را به حداقل می رساند، عوامل بیماری زا و انگلی را از بین برده و مواد آلی را به انرژی زیستی تغییر می دهد (جین و همکاران، ۲۰۱۷). این روش مزایایی مانند کاهش تغییرات آب و هوایی جهان را فراهم کرده و نگرانی های زیست محیطی، به دلیل مدیریت پسماند مواد جامد، از بین می برد (تومازیک و همکاران، ۲۰۲۰). در مقایسه با جامدات زیستی لجن فاضلاب به عنوان یک ماده ناهمگن حاوی مقدار قابل توجهی ترکیبات معدنی است که با فرآیند گرماکافت نمی توان آن را کاهش داد و بازده محصول جامد معدنی بالاتر است. بعد از تهیه بیوپچار از لجن فاضلاب باید ویژگی هایی همچون بازده بیوپچار، مقدار فلزات سنگین تثبیت شده در آن و ساختار بیوپچار از لحاظ مورفولوژی و سطح مورد ارزیابی قرار گیرد

و با استانداردهای موجود سنجیده شود (رک و همکاران، ۲۰۲۰).

مطالعات متعددی نشان داد، ماده اولیه و دمای گرماکافت در تهیه بیوپچار از جمله بیوپچار لجن فاضلاب به طور قابل توجهی بر خصوصیات مختلف آن تأثیرگذار است (بهشتی و همکاران ۱۳۹۵، خانمحمدی و همکاران، ۲۰۱۵، کریمی و همکاران، ۲۰۱۷ و دخت و همکاران ۲۰۱۷). علاوه بر ماده اولیه و دمای گرماکافت، ویژگی های بیوپچار تحت تأثیر زمان و سرعت اعمال گرما، اکسیژن و فشار نیز می باشد. بیوپچار می تواند حاوی ورقه های بلوری گرافن و ترکیبات آروماتیکی بی شکل باشد. ترکیبات آروماتیکی به طور عمده دارای عناصر اکسیژن، نیتروژن، فسفر و گوگرد هستند. حضور این عناصر در حلقه آروماتیکی نقش زیادی در ناهمگنی و واکنش پذیر بودن سطح بیوپچار دارند (شعبان و همکاران، ۲۰۱۸).

دمای گرماکافت نقش اصلی در مشخصات و کیفیت بیوپچار لجن فاضلاب دارد (خانمحمدی و همکاران، ۲۰۱۵ و کریمی و همکاران ۲۰۱۷). با افزایش دمای گرماکافت، میزان خاکستر افزایش یافته اما عملکرد بیوپچار کاهش می یابد. دمای گرماکافت همچنین بر خصوصیات سطح و ماهیت اسیدی بیوپچار لجن فاضلاب تأثیر می گذارد (حسین و همکاران، ۲۰۱۷). بیوپچار تولید شده در دمای پایین تر به طور کلی ماهیت اسیدی دارد، در حالی که در دمای بالا قلیایی است. ماهیت قلیایی بیوپچار در دمای بالای ۵۰۰ درجه سلسیوس به دلیل آزاد شدن اکسید سدیم است که باعث افزایش pH بیوپچار می شود. دمای گرماکافت همچنین بر مورفولوژی و ساختار بیوپچار تأثیر دارد. با افزایش دما، سطح ویژه و سطح منافذ افزایش می یابد. با این حال، دمای بالا باعث کاهش تخلخل بیوپچار می شود اما صافی ساختار سطح و ساختار آروماتیکی را افزایش می دهد (گائو و همکاران، ۲۰۱۷). به احتمال زیاد به دلیل تجزیه مواد آلی و تشکیل منافذ ریز

یک همبستگی مثبت بین حجم منافذ ریز بیوپچار و مساحت آن وجود دارد (تومازیک و همکاران، ۲۰۲۰). در دمای پایین گرماکافت، چگالش مواد فرار آلی رخ داده و سبب گرفتگی منافذ می‌شود در نتیجه، سطح برای جذب، کاهش می‌یابد (فرایدا و ویسر، ۲۰۱۵). در مقابل دمای بالا و تبخیر مواد و ایجاد فضاهای خالی در بیوپچار آن را متخلخل‌تر می‌کند (سینق و همکاران، ۲۰۲۰). با افزایش دما ممکن است لایه‌های گرافن بسیار نامنظم توسعه یافته و سبب تشکیل منافذ ریز بیشتر در ساختار بیوپچار شود. ترک‌خوردگی سطح بیوپچار و ایجاد فضاهای خالی در داخل آن، به دلیل خروج انواع ترکیبات آلی طی فرایند گرماکافت، سبب افزایش سطح قابل‌دسترسی خارجی می‌شوند (زی و همکاران، ۲۰۱۶).

توزیع اندازه منافذ در بیوپچار به صورت میکروپورها، مزوپورها و ماکروپورها هستند که فاکتورهای مهم در نحوه عملکرد بیوپچار هستند. منافذ موجود در بیوپچار به منافذ نانو ($< 9 \text{ nm}$)، منافذ میکرو ($< 2 \text{ nm}$)، منافذ مزو ($2-50 \text{ nm}$) و منافذ بزرگ ($> 50 \text{ nm}$) دسته‌بندی شده‌اند. هر چه توزیع منافذ به سمت منافذ میکرو باشد سطح کل بیوپچار بزرگتر است (لهمن و جوزف، ۲۰۱۵). بررسی ساختار بیوپچارها با استفاده از روش میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، امکان ریخت‌شناسی فیزیکی و بررسی تخلخل مواد جامد را فراهم می‌کند (کیم و همکاران، ۲۰۱۳). بررسی بیوپچارهای تهیه شده در دمای مختلف با استفاده از SEM نشان داد به دلیل وجود آلاینده‌های مختلف آلی و غیرآلی، لجن فاضلاب دارای لایه‌ای بشقاب مانند با ساختار نازک، صاف و متراکم است (برولمن و همکاران، ۲۰۱۷).

شرایط گرماکافت، دما و ماده خام باعث ایجاد ویژگی‌های متمایز کننده بیوپچار شده و بر کارایی آن برای فلزات سنگین مختلف تأثیر می‌گذارد (لیما و همکاران، ۲۰۱۴). دخت و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند در دماهای بالای گرماکافت، غلظت فلزات سنگین، pH خاک، مقدار خاکستر و ساختار آروماتیکی افزایش یافت. ژو و همکاران،

(۲۰۱۷) با استفاده از بیوپچار لجن فاضلاب، تغییرات جذب و تحرک منگنز، روی، کروم و مس را ارزیابی کردند. مطالعه آنها نشان داد بیوپچارلجن فاضلاب از تحرک فلزات سنگین می‌کاهد بنابراین می‌توان از آن به عنوان اصلاح کننده استفاده کرد. به دلیل افزایش غلظت فلزات سنگین در بیوپچارهای آن به دلیل گرماکافت، ارزیابی خطر زیست محیطی این فلزات در لجن فاضلاب و بیوپچار آن، منجر به تصمیم‌گیری مناسب و میزان استفاده بهینه از آنها در چرخه عناصر غذایی خواهد شد. برای ارزیابی خطر بالقوه آلودگی مربوط به حضور فلزات سنگین در لجن فاضلاب، از روش‌های جزءبندی استفاده می‌شود. با تعیین جزءهای فلزات سنگین، می‌توان در دسترس بودن آنها برای گیاهان یا ریزجانداران خاک و در نتیجه سمیت بالقوه آنها را ارزیابی کرد. استخراج متوالی BCR یکی از روشهای جزءبندی بوده و شامل جزءهای: محلول در آب و تبدالی (F1)، متصل به کربناتها و اکسیدهای (F2) Fe-Mn، متصل به مواد آلی و سولفیدها (F3) و باقیمانده (F4) است (بوگازس و اولزوک، ۲۰۲۰). مقدار کل فلز سنگین معمولاً براساس قابلیت دسترسی زیستی به سه دسته زیست فراهم، زیست‌فراهمی بالقوه و غیر زیست‌فراهم تقسیم می‌شوند. جزء قابل حل در اسید و قابل تبادل و همچنین قابل احیا (F1 و F2) در دسته فلزات زیست فراهم قرار گرفته و به شدت در معرض آبشویی هستند. جزء قابل اکسید (F3) به عنوان فلزات با زیست فراهم بالقوه، به‌سختی آبشویی شده و تحت شرایط اکسیدی و اسیدی شدید، آبشویی می‌شوند. جزء باقیمانده در گروه غیرزیست‌فراهم قرار گرفته و آبشویی نمی‌شوند (جین و همکاران، ۲۰۱۶).

برای مشخص شدن خطر آلاینده‌های فلزات سنگین از شاخص‌های فاکتور آلودگی (C_f) و احتمال خطر زیست محیطی (E_f) استفاده می‌شود (زاهو و همکاران، ۲۰۱۲) و در لجن فاضلاب و بیوپچارهای آن بر اساس جزءبندی به روش BCR محاسبه می‌شوند با توجه به مطالب گفته‌شده به دلیل حضور منافذ با اندازه‌های مختلف و سطح ویژه بالا بیوپچار

کل فلزات روی و سرب (جین و همکاران، ۲۰۱۶) تعیین شدند.

(۱)

۱۰۰ * (وزن اولیه لجن / وزن بیوپار حاصل) = عملکرد

مقادیر عناصر C, N, H, O و S با دستگاه بررسی (element analysis instrument Cotech 4010, Italy)، سطح ویژه و بررسی منافذ با استفاده از همدمای جذب N₂، سطح BET و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، تعیین شدند. سطح، Brunauer-Emmett-Teller (BET)، مساحت هر گرم نمونه است و معمولاً با جذب فیزیکی گاز نیتروژن N₂ و CO₂ روی سطح بیوپار در دمای نیتروژن مایع اندازه گیری می شود. (جین و همکاران، ۲۰۱۶). توانایی ایجاد زیستگاه های میکروبی، ایجاد هسته های خاکدانه، حفظ آب و مواد مغذی اضافه شده، و حذف آلاینده ها به سطح (BET) وابسته است. سطح (BET) معیاری برای کیفیت و ویژگی های بیوپار است و با توجه به دمای گرمایافت مورد استفاده در تهیه بیوپار، ترجیحاً باید بیشتر از ۱۵۰ مترمربع برگرم باشد. جزء بندی فلزات روی و سرب در لجن فاضلاب و بیوپارهای آن مطابق روش BCR (رائورت و همکاران، ۱۹۹۹). که جزئیات آن در جدول ۱ آورده شده، انجام و غلظت فلزات با استفاده از دستگاه جذب اتمی (مدل جی بی سی، ۹۳۲) تعیین شد.

جدول ۱- خلاصه روش BCR مورد استفاده در جزء بندی روی و سرب

زمان-دما	عصاره گیرها	جزء های فلزات
۱۶ ساعت شیک در دمای آزمایشگاه	۴۰ میلی لیتر اسید استیک ۰/۱۱ مولار	قابل حل در اسید و تبادل
۱۶ ساعت شیک در دمای آزمایشگاه	۴۰ میلی لیتر NaOH-HCl، ۰/۵ مولار (pH=۱/۵)	کربنات ها، اکسیدها و قابل احیا
۱ ساعت شیک در دمای آزمایشگاه + ۲ ساعت در دمای ۸۵°C	۱۰ میلی لیتر آب اکسیژنه ۸/۸ مولار + ۵۰ میلی لیتر آمونیوم استات (pH=۲)	پیوند شده با ماده آلی، قابل اکسید
۱۶ ساعت در دمای ۸۰°C	هضم با اسید نیتریک ۴ مولار	باقیمانده

احتمال خطر زیست محیطی (E_r) و فاکتور آلودگی (C_f) با استفاده از روابط زیر محاسبه شدند

$$C_f = (F_1 + F_2 + F_3) / F_4 \quad (۲)$$

$$E_r = T_r * C_f \quad (۳)$$

C_f: فاکتور آلودگی^۱، مجموع جزء های محلول در اسید و قابل تبادل (F_۱)، قابل احیا (F_۲) و قابل اکسید (F_۳) (جزء قابل دسترس در BCR)، F_۴: جزء باقیمانده، E_r: احتمال خطر

^۱ - Contamination factor

اولیه بوده و با افزایش دما افزایش می‌یابد (رک و همکاران، ۲۰۲۰).

بیوچارهای تولید شده دارای pH قلیایی و با افزایش دمای گرماکافت، pH افزایش یافت. با تبدیل لجن فاضلاب به بیوچار در دماهای مختلف، تقریباً همه اکسیدهای فلزی و مواد معدنی به عنوان محتوای خاکستر در بیوچارها حفظ می‌شوند و می‌تواند دلیل بر خصلت قلیایی و افزایش pH باشند. همبستگی مثبت بین دمای بیوچار و pH ($r=0.98$ و $P<0.05$)، همچنین بین pH و خاکستر ($r=0.92$ و $P<0.05$) وجود داشت. این نتایج می‌تواند نشان دهد که مقدار خاکستر بیوچار اثر قابل توجهی بر قلیائیت بیوچارها داشته است. حضور ساختارهای آروماتیکی در بیوچارها نیز به عنوان عامل موثر بر pH قلیایی بیوچارها معرفی شده است. سایر محققین نیز چنین نتایجی را گزارش کرده‌اند (مندز و همکاران، ۲۰۱۳، چن و همکاران، ۲۰۱۴ و جین و همکاران، ۲۰۱۷). قابلیت هدایت الکتریکی (EC) لجن فاضلاب ۶/۲۵ دسی زیمنس بر متر اندازه‌گیری شد (جدول ۲)، در حالی که EC بیوچارهای آن با کاهش قابل توجه همراه بود که نشان‌دهنده کاهش نمک‌های محلول در بیوچار است. EC به نوع ماده خام و شرایط گرماکافت وابسته بوده و با افزایش دمای گرماکافت و افزایش مقدار خاکستر، حلالیت نمک‌ها و فلزات کاهش می‌یابد (مندز و همکاران، ۲۰۱۳). این روند می‌تواند به تجزیه نمک‌های قابل حل در دماهای بالای گرماکافت نیز نسبت داد (یوان و همکاران، ۲۰۱۵) و با افزایش دمای گرماکافت این پارامتر می‌تواند کاهش یابد (رک و همکاران، ۲۰۲۰).

زیست محیطی برای هر یک از فلزات سنگین است. T_r : فاکتور پاسخ سمیت^۲ برای فلزات سنگین، در مباحث بررسی آلودگی این فلزات تعریف شده است. این فاکتور برای روی ۱ و برای سرب ۵ در نظر گرفته شد (جین و همکاران، ۲۰۱۷). شاخص RAC (رابطه ۴) به عنوان خطر محیطی ناشی از وجود فلزات سنگین در جزء قابل تبادل توصیف می‌شود (جین و همکاران، ۲۰۱۷).

$$\%RAC = (F1)/(F2 + F3 + F4) \quad (4)$$

نتایج و بحث

ویژگی‌های بیوچار لجن فاضلاب

ویژگی‌های لجن فاضلاب و بیوچارهای آن در جدول ۲ آورده شده است. به طور کلی درصد عملکرد بیوچار با افزایش دمای تولید بیوچار کاهش یافت. کاهش عملکرد احتمالاً به دلیل تبدیل و تغییرات در طول گرماکافت بوده و می‌توان آن را به تجزیه مواد خام اولیه و یا واکنش‌های ثانویه در باقیمانده جامد در اثر گرماکافت نسبت داد. درصد خاکستر در بیوچارها در مقایسه با لجن بیشتر و با افزایش دما مقدار خاکستر ۱۷٪ افزایش یافت. این نتیجه می‌تواند نشان‌دهنده تغلیظ بیشتر ترکیبات معدنی در طول فرآیند تجزیه در اثر گرماکافت باشد نتایج مشابهی توسط سایر پژوهشگران گزارش شده است (آگروفیتی و همکاران ۲۰۱۳، جین و همکاران، ۲۰۱۷). به طور کلی مقدار خاکستر معدنی یک معرف از مواد معدنی و عناصر غذایی موجود پس از حذف مواد آلی و آب در طی گرماکافت است. بنابراین مقدار خاکستر در بیوچار منعکس کننده محتوای مواد معدنی در ماده خام

جدول ۲- برخی خصوصیات فیزیکوشیمیایی لجن فاضلاب و بیوچارهای تهیه شده در دماهای مختلف

دمای بیوچار (°C)	عملکرد %	خاکستر %	pH	EC dS.m ⁻¹	C	O	N %	H	H/C	O/C
لجن فاضلاب	-	^a ۴۴	^e ۶/۵	^a ۶/۲۵	۳۲/۱۷	۲۳/۲۹	۵/۸۸	۵/۵۱	۰/۱۵۶	۰/۵۴۲
۳۰۰	^a ۷۶/۰	^d ۵۸	^d ۷/۳	^b ۱/۸۳	۲۸/۳۲	۱۸/۳۲	۴/۰۳۶	۱/۳۷	۰/۱۳۱	۰/۴۸۵
۴۰۰	^b ۶۵/۵	^c ۶۴/۳	^c ۸/۶	^b ۱/۹۸	۲۲/۰۲	۱۳/۷۱	۲/۸۷	۱/۹۶	۰/۱۱۱	۰/۴۶۶
۵۰۰	^b ۶۳/۵	^c ۶۵/۴	^b ۱۰/۵	^c ۱/۶۲	۲۱/۵۰	۱۳/۰۴	۲/۸۵	۱/۰۷	۰/۱۱۳	۰/۴۵۴
۶۰۰	^c ۵۶/۷۵	^b ۷۰/۲	^b ۱۰/۳	^c ۱/۶۳	۲۱/۹۲	۱۲/۰۸	۲/۸۱	۰/۹۷	۰/۱۰۹	۰/۴۱۳

²- Toxic response factor

EC: هدایت الکتریکی - C: کربن آلی - نسبت های مولی H:C درجه آروماتیکی و O:C پایداری ساختار - * اعداد دارای حروف متفاوت، تفاوت معنی داری در سطح ۵ درصد دارند (آزمون دانکن)

از اکسیژن پایه در گروه های عاملی است (رک و همکاران، ۲۰۲۰). نسبت کوچکتر به معنی ساختار آروماتیکی قوی تر می باشد (یوان و همکاران، ۲۰۱۵). نسبت O/C در لجن فاضلاب ۰/۵۴۲ بود. این نسبت در بیوچارهای دماهای مختلف در مقایسه با لجن فاضلاب کاهش یافت و در نمونه های بیوچار نیز با افزایش دما از ۳۰۰ به ۷۰۰ کاهش نسبت O:C مشاهده شد. نسبت O:C کمتر از ۰/۲ مربوط به پایداری بیش از ۱۰۰۰ سال، نسبت بین ۰/۲-۰/۶ مربوط به پایداری ۱۰۰-۱۰۰۰ سال و نسبت بیش از ۰/۶ مربوط به پایداری کمتر از ۱۰۰ سال است (رک و همکاران، ۲۰۲۰). بنابراین بیوچارهای تولید شده در این مطالعه بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ سال پایدار هستند. نسبت H/C نیز نشان دهنده درجه آروماتیکی شدن بیوچار در طی فرایند گرماکافت است. با افزایش دما، این نسبت از ۰/۱۳۱ در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس به ۰/۱۰۳ در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس کاهش یافت. نسبت O/C و H/C در بیوچارهای دمای بالاتر کمتر از بیوچارهای تهیه در دمای پایین تر است که نشان دهنده خاصیت آروماتیکی، آبگریزی و کاهش قطبیت بیوچار با افزایش دما می باشد (فرایدا و ویسر، ۲۰۱۵). مقدار کل فلزات روی و سرب در لجن فاضلاب و بیوچارهای آن در جدول ۳ آورده شده است. لجن فاضلاب به عنوان منبعی از مواد آلی و حاوی غلظت های متفاوت از فلزات سنگین است.

تجزیه عناصر لجن فاضلاب و نمونه های بیوچار (جدول ۲)، نشان داد با تبدیل لجن به بیوچار و افزایش دمای گرماکافت درصد کربن، اکسیژن و نیتروژن کاهش یافت که نشان دهنده تبخیر این مواد در طی فرایند گرماکافت است (آگروفیتی و همکاران، ۲۰۱۳). کربن در دو بخش کربن آلی و کربن معدنی و مجموع این دو به عنوان کربن کل در لجن فاضلاب و بیوچارها وجود دارد. مقدار کربن کل و کربن آلی به نوع ماده خام اولیه وابسته است. از کربن آلی برای محاسبه نسبت های مولی H:C در تعیین درجه آروماتیکی و O:C برای تعیین پایداری ساختار استفاده می شود (رک و همکاران، ۲۰۲۰). با تبدیل لجن به بیوچار و افزایش دمای گرماکافت درصد C، کاهش یافت که نشان دهنده تبخیر آن در طی فرایند گرماکافت است. در این مطالعه با افزایش دما تا ۵۰۰ درجه سلسیوس مقدار C کاهش یافت. در آزمایشات مختلف که بر روی مواد خام اولیه متفاوت در تهیه بیوچار انجام شده، در طی فرایند گرماکافت هم افزایش و هم کاهش مقدار C در اثر این فرایند گزارش شده است. این پدیده احتمالاً به دلیل کاهش گروه عاملی OH سطحی در اثر آب زدایی بیوچار می باشد (آگروفیتی و همکاران، ۲۰۱۳، زلنيسکا و همکاران، ۲۰۱۵ و رک و همکاران، ۲۰۲۰). از نسبت O:C (جدول ۲) می توان برای پیش بینی پایداری بیوچار در خاک استفاده کرد. این نسبت به طور معمول با افزایش دمای گرماکافت کاهش می یابد، که نشانگر بیوچار پایداری با محتوای کمتری

جدول ۳- مقدار کل عناصر سنگین در لجن فاضلاب و بیوچار در دماهای مختلف

		بیوچار (درجه سلسیوس)				
فلزات سنگین	لجن فاضلاب	۳۰۰	۴۰۰	۵۰۰	۶۰۰	۷۰۰
mg.kg ⁻¹						
Pb	^d ۴۳۴	^d ۴۳۹	^c ۵۱۲	^c ۵۲۸	^b ۵۹۴	^a ۶۲۹
Zn	^e ۹۴۱/۶	^c ۱۲۲۵	^d ۱۱۸۰	^b ۱۳۷۳	^b ۱۳۸۶	^a ۱۴۳۲

* اعداد دارای حروف متفاوت، تفاوت معنی داری در سطح ۵ درصد دارند (آزمون دانکن)

بیوپچار در دماهای ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ به ترتیب ۲/۶۵، ۳/۶۵، ۸/۳۸

و ۵/۵۷ برابر لجن فاضلاب برآورد شدند. مقادیر نواحی سطحی کم BET ($100\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$) نشان دهنده تولید کربن غیر فعال در اثر گرماکافت مستقیم لجن فاضلاب می‌باشد (مندز و همکاران، ۲۰۱۳). این افزایش سطح ممکن است به دلیل تغییر در ساختار شیمیایی ماده اولیه و ایجاد ساختارهای آروماتیکی باشد. نواحی سطحی BET به ویژگی‌های ماده خام و دمای گرماکافت، سرعت حرارت دادن و زمان واکنش در ارتباط است (آگروفیتی و همکاران، ۲۰۱۳). از طرفی کاهش نواحی سطحی در دمای ۷۰۰ درجه نسبت به ۶۰۰ درجه سلسیوس، ممکن است به دلیل نفوذ خاکستر یا بلوکه شدن میکروپورها در بیوپچار باشد. هوانگ و همکاران (۲۰۱۸) گزارش کردند افزایش سطح BET به دلیل تجزیه ماده آلی و اثر کاتالیزوری عناصر فلزی موجود در ماده اولیه در طی فرایند گرماکافت است.

با افزایش دمای تولید بیوپچار غلظت کل عناصر سرب و روی در مقایسه با لجن فاضلاب به طور متوسط به

ترتیب ۲۴/۵٪، ۴۰٪ افزایش یافت. جدا شدن ترکیبات آلی و برخی از مواد معدنی، مانند کربنات با افزایش دمای گرماکافت در غنی شدن فلزات سنگین مشارکت دارند (جین و همکاران، ۲۰۱۶).

سطح ویژه و ساختار منافذ

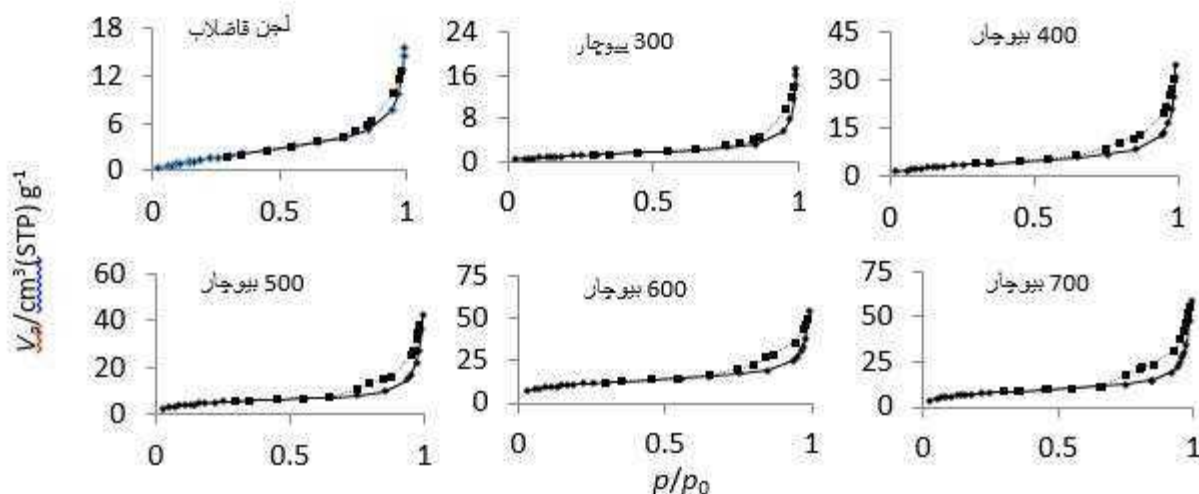
با تبدیل لجن فاضلاب به بیوپچار به جز دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس سطح ویژه افزایش یافت (جدول ۴) کمترین سطح مربوط به بیوپچار دمای ۳۰۰ و بیشترین مربوط به بیوپچار دمای ۶۰۰ بود. کاهش سطح بیوپچار دمای درجه سلسیوس ۳۰۰ نسبت به لجن فاضلاب می‌تواند به دلیل تغییر اثر دما و تغییر ساختار یک زیست جامد به بیوپچار باشد. اما سطح

جدول ۴- خصوصیات سطح لجن و بیوپچارها (BET)

دمای بیوپچار ($^{\circ}\text{C}$)	سطح BET $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$	حجم کل منافذ $\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$	میانگین قطر منافذ nm
لجن فاضلاب	۴/۴۷	۰/۰۲۲	۱۹/۹۸
۳۰۰	۳/۲۳	۰/۰۲۶	۳۲/۲۲
۴۰۰	۱۱/۸۹	۰/۰۴۸	۱۶/۳۱
۵۰۰	۱۶/۳۸	۰/۰۵۹	۱۴/۴۳
۶۰۰	۳۷/۵۷	۰/۰۷۹	۸/۴۳
۷۰۰	۲۴/۹۸	۰/۰۸۶	۱۳/۹۱

به سایر بیوپچارها بود. کاهش قطر منافذ در اثر افزایش دمای گرماکافت ممکن است به دلیل چسبیدن ذرات بیشتر به سطح خارجی و منافذ بیوپچار بوده که سبب انسداد منافذ می‌شود (هوانگ و همکاران، ۲۰۱۷).

اندازه قطر منافذ بیوپچارها (به جز دمای ۳۰۰) نسبت به لجن فاضلاب کمتر بود (جدول ۴). با افزایش دما، میانگین قطر منافذ کاهش یافت و این کاهش در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس بیشتر بود. که دلیلی برای سطح BET بیشتر نسبت



شکل ۱- همدمای جذب و واجذب نیتروژن در لجن فاضلاب و بیوچارهای آن

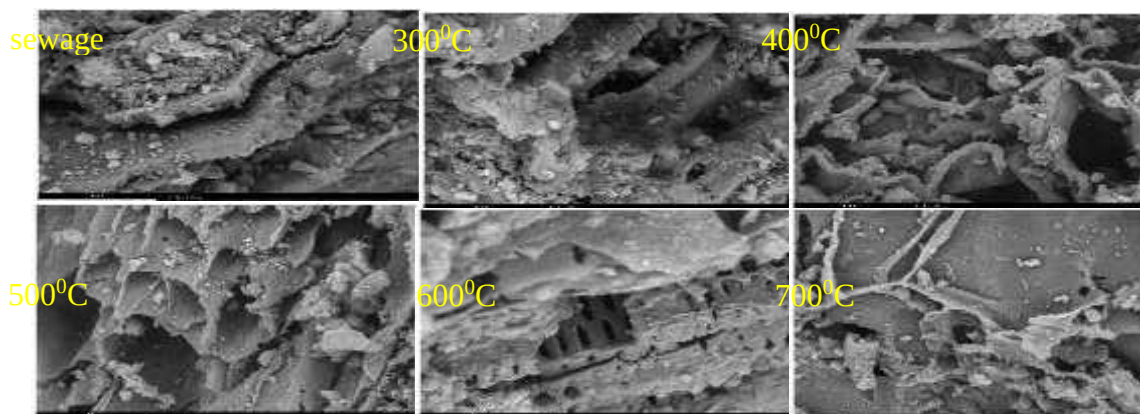
P: فشار جزئی گاز جذب شده (پاسکال)، P0: فشار اشباع گاز جذب شده، Va: حجم گاز جذب شده در شرایط استاندارد

ویژگی های خاص جاذب های کربن است. منشاء مزوپورها ممکن است در محتوای زیاد مواد معدنی در لجن فاضلاب که عمدتاً از سیلیس، آلومینا و اکسیدهای آهن تشکیل شده است، باشد (چن و همکاران، ۲۰۱۴).

خصوصیات مورفولوژیکی

میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) یک روش مفید برای مطالعه مورفولوژی ذرات جامد است. تصاویر SEM در بزرگنمایی ۲۰ میکرومتر گرفته شده است (شکل ۳). ساختار لجن فاضلاب در مقایسه با بیوچارها مسطح بود. تغییر ساختار در مقایسه ی لجن فاضلاب و بیوچارها به وضوح مشخص است. بیوچار دمای ۳۰۰ و ۴۰۰ ساختاری شبیه دسته های نانولوله با پراکندگی ذرات مختلف اجزای غیرآلی و حاوی غلظت بالایی از فلزات به نمایش می گذراد (چین و همکاران، ۲۰۱۶).

با توجه به حجم کل منافذ می توان نتیجه گرفت که با تبدیل لجن به بیوچار و افزایش دما در بیوچارها تخلخل در آنها افزایش می یابد. همدمای جذب و واجذب لجن فاضلاب و بیوچارهای آن (شکل ۲)، منعکس کننده ساختار منافذ است. بررسی این همدمای نشان داد با افزایش دمای گرمای کافت مقدار جذب N2 افزایش یافته و بیشترین مقدار در بیوچارهای ۶۰۰ و ۷۰۰ بود. مطابق با دسته بندی ایوپاک، این ایزوترمها از نوع ایزوترم IV و نوع H3 و نشان دهنده جذب فیزیکی بوده و فرضیه رفتاری این ایزوترمها نشان دهنده ی ۱- منافذ از نوع مزو (۵۰-۲۰۰ نانومتر)، ۲- رخ دادن تراکم مویینیگی ۳- گردن باریک و بدنه پهن که منعکس کننده پدیده (ink bottle) بود. منافذ در بیوچارها به سه دسته میکرو (<۲nm)، مزو (۵۰nm-۲) و ماکرو (>۵۰ nm) دسته بندی شده است. حلقه های نوع H3 از نوع شکاف مانند بوده و از



شکل ۳- ساختار در لجن فاضلاب و بیوچار آن با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با بزرگنمایی ۲۰ Um

ارزیابی خطر آلاینده‌گی لجن فاضلاب و بیوچار آن

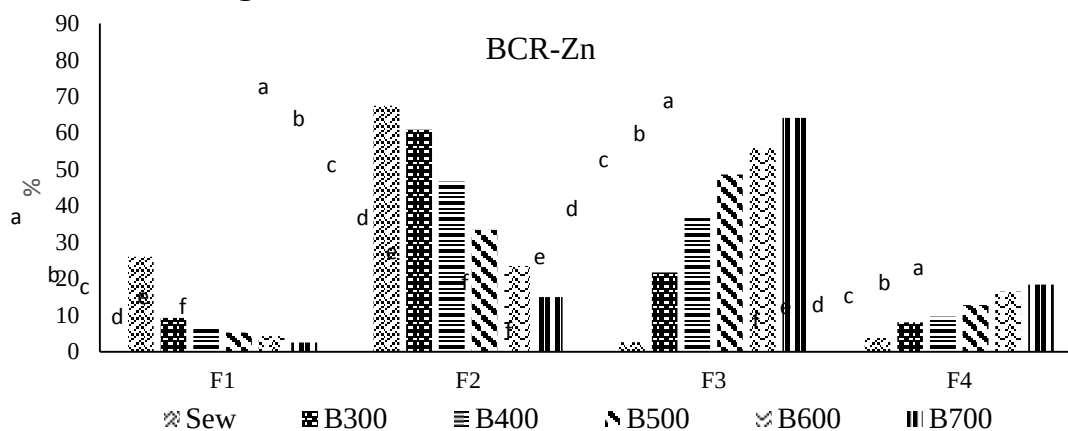
در بین پروتکل‌های مختلف جزءبندی، روش استخراج متوالی (Community Bureau of Reference) BCR، یکی از پرکاربردترین روش‌ها است که امکان ارزیابی سریع خطرات احتمال آلودگی را فراهم می‌کند (بوگاس و همکاران، ۲۰۱۸). با تعیین جزءهای فلزات سنگین، می‌توان در دسترس بودن آنها برای گیاهان یا ریزجانداران خاک و در نتیجه سمیت بالقوه آنها را ارزیابی کرد. استخراج متوالی BCR شامل جزءهای: محلول در آب، متصل به کربناتها، فلزات قابل مبادله (F_1)، متصل به اکسیدهای $Fe-Mn$ (F_2)، متصل به مواد آلی و سولفیدها (F_3) و متصل به جزء باقیمانده (F_4) است (لیو و همکاران، ۲۰۱۶ و بوگاس و همکاران، ۲۰۲۰). جزء قابل حل در اسید و قابل تبادل و همچنین قابل احیاء از فلزات سنگین قابل استخراج با BCR در دسته فلزات زیست فراهم قرار گرفته و به شدت در معرض آبشویی هستند. جزء قابل اکسید به عنوان فلزات سنگین با زیست فراهمی بالقوه دسته بندی شده‌اند که به سختی آبشویی شده و تحت شرایط اکسیدی و اسیدی شدید، آبشویی می‌شوند (لیو و همکاران، ۲۰۱۶). در نهایت جزء باقیمانده که در گروه غیرزیست فراهم قرار گرفته و آبشویی نمی‌شوند (جین و همکاران، ۲۰۱۷).

توزیع درصد اجزاء روی (Zn) در شکل ۴ آورده

شده درصد بازیابی روی در لجن فاضلاب، با روش BCR.

با افزایش دما، تخلخل و ناهمواری بر سطح بیوچارها افزوده شده و در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس ساختار لانه زنبوری قابل مشاهده و نشان‌دهنده ترکیبات آروماتیکی پیچیده بر سطح بیوچار است (شکل ۳). اجزای معدنی به طور نامنظم به هر دو سطح خارجی و منافذ داخلی بیوچار چسبیده‌اند (یانگ و همکاران، ۲۰۱۶). از مقایسه تصویر SEM بیوچارها (شکل ۲) مشخص شد بیوچار تولید شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس نسبت به سایر بیوچارها متخلخل‌تر است و هنگامی که دما به ۷۰۰ درجه افزایش یافت، سطح بیوچار ناهمواری کمتری داشت. داده‌های BET از سطح بیوچار در بخش قبل، تأیید کننده تخلخل زیاد بیوچار دمای ۶۰۰ است زیرا بیشترین سطح مربوط به این بیوچار بود. فعل و انفعالات بین اجزای لجن فاضلاب در فرایند گرماکافت سبب افزایش ناهمگنی در بیوچار می‌شود. وقتی پیوندهای شیمیایی شکسته و کمپلکس‌ها ذوب می‌شوند، منافذ بیشتری در ساختار مواد ایجاد می‌شود (کریمی و همکاران، ۲۰۲۰). ساختار مورفولوژیکی (شکل ۳) مختلفی در سطح بیوچارها شامل: ۱- ساختار متخلخل، ۲- ذره‌های با شکل نامنظم، ۳- ساختار متراکم صاف (سینق و همکاران، ۲۰۲۰) وجود داشت. این ساختارها برای همه بیوچارها مشابه بود.

یا قابل اکسید (جزء آلی و سولفید) غنی می شود، در حالی که کمتر در کسر باقیمانده است (چاناکا و همکاران، ۲۰۱۸). با تبدیل لجن به بیوچار بخش زیست فراهم (جزء تبدیلی+جزء قابل احیاء) به طور قابل توجهی کاهش یافت. بخش زیست فراهم با افزایش دمای گرماکافت از ۳۰۰ به ۷۰۰ درجه سلسیوس به تدریج ۱۸ تا ۷۰ درصد کاهش یافت (شکل ۴).



شکل ۴- درصد توزیع جزءهای روی

(F1: جزء تبالی، جزء F2 قابل احیا، F3: جزء قابل اکسید و F4: جزء باقیمانده)،

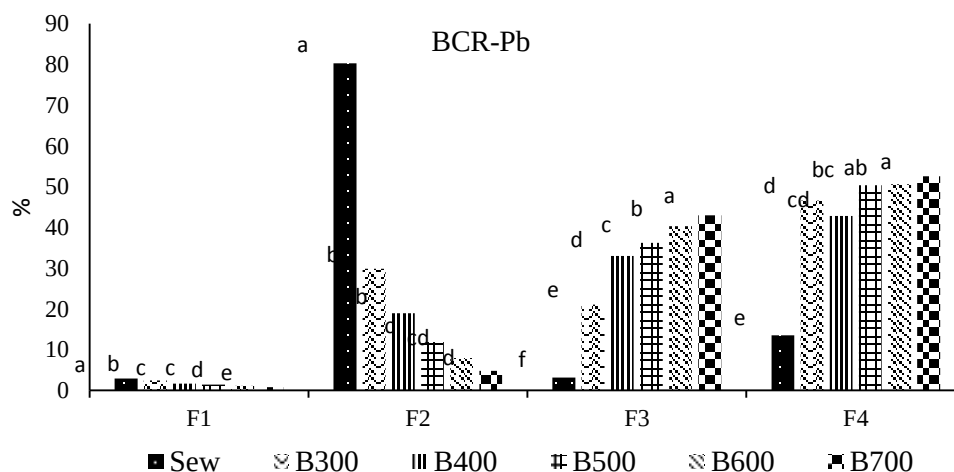
حروف نشان دهنده تفاوت معنی داری در سطح ۵ درصد (آزمون دانکن)

تا ۸۲ درصد بیشتر شد. چن و همکاران (۲۰۱۴)، نیز چنین نتایجی را ارائه کردند.

با تغییر دمای گرماکافت جزءهای سرب (Pb) دچار تغییرات شدند (شکل ۵). درصد بازیابی سرب در لجن فاضلاب، با روش BCR، ۸۷٪ برآورد شد. بیش از ۸۰٪ از سرب در لجن فاضلاب به شکل قابل احیاء بود. سرب در جزء تبدیلی و قابل حل در اسید در حدود ۳ درصد از کل سرب عصاره گیری شده بود. سرب به ترتیب به شکل قابل احیاء < باقیمانده < قابل اکسید < تبدیلی در لجن فاضلاب وجود داشت. در مجموع در لجن فاضلاب ۸۳ درصد از سرب به شکل زیست فراهم بود. با تبدیل لجن فاضلاب به بیوچارها، جزء تبدیلی به طور متوسط ۱/۴ درصد کاهش یافت و با مقایسه این جزء در بیوچارها، با افزایش دمای گرماکافت از ۳۰۰ به ۷۰۰ درجه سلسیوس ۱/۶ درصد کاهش یافت.

۹۵٪ برآورد شد. نتایج نشان داد بیش از نیمی از روی در لجن فاضلاب به شکل قابل احیاء بود. ۲۶٪ از کل روی عصاره گیری شده در جزء تبدیلی قرار داشت که به شدت در معرض آبشویی قرار دارد. در مجموع ۹۳ درصد از روی به شکل زیست فراهم در لجن فاضلاب حضور دارد. روی در لجن فاضلاب به طور عمده در جزء قابل احیاء (اکسید Fe-Mn)

بیشترین تغییر روی در جزء تبدیلی مشاهده شد، به طوریکه به تدریج ۱۴ تا ۴۸ درصد با افزایش دما از ۳۰۰ به ۷۰۰ درجه سلسیوس در مقایسه با لجن فاضلاب کاهش داشت. افزایش دما سبب کاهش جزء تبدیلی و قابل احیاء روی در بیوچارها شد. با افزایش دمای گرماکافت بیشترین درصد تغییرات در جزء قابل احیاء (۴۶٪ کاهش) و جزء قابل اکسید (۴۳٪ افزایش) مشاهده شد. در بخش باقیمانده با تغییر دمای گرماکافت از ۳۰۰ به ۷۰۰ درجه سلسیوس مقدار روی ۱۰٪ افزایش یافت. در حالی که جزء تبدیلی با افزایش دمای گرماکافت در حدود ۷ درصد کاهش داشت. این نتایج نشان دهنده تغییر شکل فلز روی از بخش زیست فراهم به بخش غیرزیست فراهم (جزء قابل اکسید+باقیمانده) بود. این تغییر با افزایش دمای گرماکافت از ۳۰۰ به ۷۰۰ درجه سلسیوس، ۳۰



شکل ۵- درصد توزیع جزءهای سرب
(F1: جزء تبالی، جزء F2 قابل احیا، F3: جزء قابل اکسید و F4: جزء باقیمانده)،
حروف نشان دهنده تفاوت معنی داری در سطح ۵ درصد (آزمون دانکن)

اکسید قابل احیا < تبدلی بود. مشابه این نتایج توسط دیگر محققین نیز گزارش شده است (چن و همکاران، ۲۰۱۵، جین و همکاران، ۲۰۱۷ و بوگاس و همکاران، ۲۰۲۰). جزء بندی دو فلز روی و سرب به روش BCR نشان داد گرماکافت لجن فاضلاب سبب کاهش زیست فراهمی این دو فلز شده و افزایش دمای گرماکافت با تغییر خصوصیات فیریکوشیمیایی بیوچارها این اثر را تشدید می‌کند. به دلیل سمیت و زیست فراهمی فلزات سنگین در لجن فاضلاب و افزایش غلظت این فلزات در بیوچارهای آن، تعیین و ارزیابی خطر زیست محیطی در لجن فاضلاب و بیوچار آن منجر به تصمیم‌گیری مناسب و میزان استفاده مطلوب از آنها در چرخه عناصر غذایی خواهد شد (هو و همکاران، ۲۰۱۶). برای مشخص شدن خطر فلزات سنگین از فاکتور آلودگی (Cf)، احتمال خطر زیست محیطی (Er) (جدول ۵ و ۶) و شاخص RAC به عنوان خطر محیطی ناشی از وجود فلزات سنگین در جزء قابل تبدلی لجن فاضلاب و بیوچارها (شکل ۶) تعیین شدند.

در طی گرماکافت بیشترین درصد تغییرات مربوط به جزء قابل احیا بود به طوریکه این جزء در بیوچار ۳۰۰ حدود ۵۰ درصد و به تدریج با افزایش دمای گرماکافت تا ۷۰۰ درجه سلسیوس، حدود ۷۵ درصد در مقایسه با لجن فاضلاب کاهش یافت. بنابراین بخش زیست فراهم سرب با افزایش دمای گرماکافت از ۳۲ درصد (بیوچار ۳۰۰) به ۶ درصد (بیوچار ۷۰۰) به تدریج کاهش یافت. بخش قابل اکسید و باقیمانده در همه بیوچارها در مقایسه با لجن فاضلاب افزایش یافت. سرب از بخش زیست فراهم لجن فاضلاب به بخش زیست فراهمی بالقوه و غیرزیست فراهم در بیوچارها تغییر شکل داد (شکل ۵). مجموع این دو جزء در بیوچار ۳۰۰ درجه سلسیوس ۶۸ درصد بود و به تدریج با افزایش دمای گرماکافت تا ۷۰۰ درجه سلسیوس به ۹۴ درصد رسید. نکته قابل توجه اینکه بیشترین مقدار سرب در بیوچارها، به شکل باقیمانده تغییر شکل یافت. در دماهای بالاتر از ۳۰۰ درجه سلسیوس، فلزات متصل به جزء قابل اکسید در نتیجه تجزیه مواد آلی و سولفیدها به باقیمانده تبدیل می‌شوند. در همه بیوچارها، سرب به ترتیب در جزء باقیمانده <

جدول ۵- شاخص های آلودگی زیست محیطی فلزات سنگین (جین و همکاران، ۲۰۱۷)

Cf	Metal contamination	Er	Potential ecological risk	RAC%	Risk assessment code
Cf < 1	Clean	Er ≤ ۴۰	Low	RAC < ۱	No risk
۱ < Cf < ۳	Low	۴۰ < Er ≤ ۸۰	Moderate	۱ < RAC < ۱۰	Low
۳ < Cf < ۶	Moderate	۸۰ < Er ≤ ۱۶۰	Considerable	۱۰ < RAC < ۳۰	Medium
۶ < Cf < ۹	Considerable	۱۶۰ < Er ≤ ۳۲۰	High	۳۰ < RAC < ۵۰	High
Cf > ۹	High	Er > ۳۲۰	Very high	> ۵۰	Very high

(Moderate) و با احتیاط (Considerate) بودند. بررسی شاخص احتمال خطر زیست محیطی (E_r) فلز روی نشان داد این شاخص برای لجن فاضلاب و بیوپارهای آن از ۴۰ کمتر بوده و در رده خطر کم (Low) قرار داشت. فاکتور آلودگی سرب (C_f) در لجن فاضلاب جدول ۸ در رده احتیاط (Considerate) قرار گرفت.

داده های جدول ۶ نشان داد فاکتور آلودگی روی (C_f) در لجن فاضلاب از ۹ بزرگتر بود و بر اساس اطلاعات جدول ۵، در رده زیاد (High) قرار گرفت. با تبدیل لجن فاضلاب به بیوپار ۳۰۰، این فاکتور در حدود ۵۴ درصد کاهش یافت. با افزایش دما به ۷۰۰ درجه سلسیوس در مقایسه با لجن فاضلاب C_f برای فلز روی ۸۰٪ کاهش یافت. بیوپارها (به جز بیوپار دمای ۳۰۰) در رده متوسط

جدول ۶- ارزیابی خطر زیست محیطی فلزات موجود در لجن فاضلاب و بیوپارهای آن

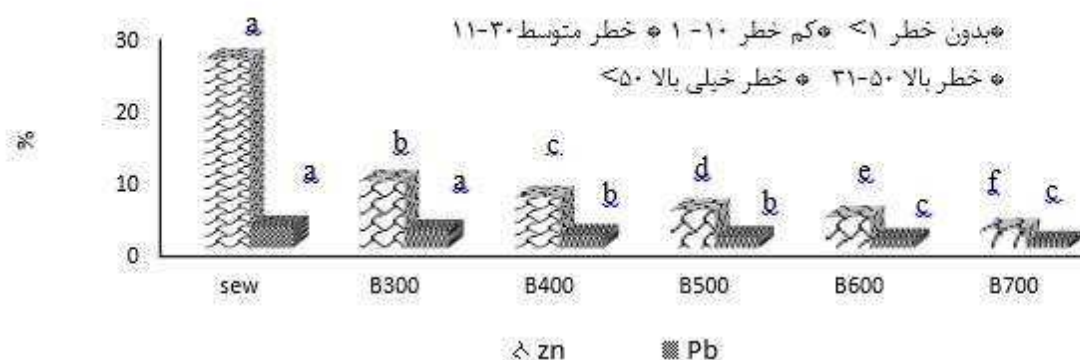
E_r		C_f		
Pb	Zn	Pb	Zn	
a۳۶/۳۵	a۲۵/۴۲	a۷/۲۷	*a۲۵/۴۲	لجن فاضلاب
b۳۳/۷۹	b۱۱/۴۰	b۴/۷۵	b۱۱/۴۰	بیوپار ۳۰۰
c۱۳/۳۷	c۹/۳۸	c۲/۶۷	c۹/۳۸	بیوپار ۴۰۰
d۱۳/۳۳	d۶/۸۰	d۲/۶۶	d۶/۸۰	بیوپار ۵۰۰
e۱۲/۲۷	e۵/۰۷	e۲/۴۵	e۵/۰۷	بیوپار ۶۰۰
e۱۰/۵۵	f۴/۴۲	e۲/۱۱	f۴/۴۲	بیوپار ۷۰۰

*اعداد دارای حروف متفاوت، تفاوت معنی داری در سطح ۵ درصد دارند (آزمون دانکن)

خطر متوسط از نظر آلودگی بود. با تبدیل شدن لجن به بیوپار این شاخص برای روی به کم خطر تغییر یافت. در شکل ۶ این شاخص برای لجن فاضلاب و بیوپارهای آن نشان داده شده است. شاخص RAC٪ برای سرب در لجن فاضلاب و بیوپارهای آن به جز بیوپار ۷۰۰ (بدون خطر) در محدوده کم خطر قرار داشت. در مجموع در لجن فاضلاب و بیوپارهای آن شاخص های آلودگی روی بیشتر از سرب بود. نتایج نشان داد بیوپار لجن فاضلاب در مقایسه با ماده خام اولیه در تمامی دماها خطر آلودگی کمتری برای سرب و روی داشت و با افزایش دما این خطر به حداقل رسید.

با تبدیل لجن به بیوپار ۳۰۰ این فاکتور در حدود ۳۴ درصد کاهش یافت. با افزایش دما به ۷۰۰ درجه سلسیوس در مقایسه با لجن فاضلاب C_f سرب ۷۱٪ کاهش یافت. بیوپارها (به جز بیوپار دمای ۳۰۰) در رده کم (Low) بودند. بررسی شاخص احتمال خطر زیست محیطی (E_r) نشان داد این شاخص برای لجن فاضلاب و بیوپارهای آن از ۴۰ کمتر بوده و در رده خطر کم (Low) قرار داشت (هو و همکاران، ۲۰۱۶ و جین و همکاران، ۲۰۱۷).

شاخص RAC٪ (رابطه ۴) به عنوان خطر محیطی ناشی از وجود فلزات سنگین در جزء قابل تبادل توصیف می شود. بر اساس این شاخص، روی در لجن فاضلاب دارای



شکل ۶- شاخص RAC % در لجن فاضلاب و بیوچارهای آن

(اعداد دارای حروف متفاوت، تفاوت معنی‌داری در سطح ۵ درصد دارند (آزمون دانکن))

نتیجه‌گیری

لانه زنبوری بهم پیوسته که نشان دهنده ساختار ترکیبات آروماتیک پیچیده است قابل رویت بود. نتایج جزءبندی روی و سرب نشان داد با تبدیل شدن لجن فاضلاب به بیوچار و افزایش دمای گرماکافت بخش زیست‌فراهم به بخش غیرزیست‌فراهم منتقل شده و خطر آبخوبی این دو فلز کاهش یافت. فاکتور آلودگی روی و سرب در لجن فاضلاب به ترتیب در کلاس زیاد و احتیاط قرار داشت. اما در بیوچارها این فاکتور کاهش قابل ملاحظه‌ای یافت و در کلاس کم قرار گرفت. شاخص RAC% نیز تأییدکننده کاهش خطر آلودگی روی و سرب در اثر تبدیل لجن فاضلاب به بیوچار بود.

با تبدیل لجن فاضلاب به بیوچار، ماده‌ای جدید با ویژگی‌های منحصر به فرد تولید می‌شود. بیوچارها تحت تأثیر دمای گرماکافت، دارای ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی متفاوتی بودند. از جمله سطح بیوچار که در اثر افزایش دما تا ۶۰۰ درجه سلسیوس افزایش یافت. این افزایش را می‌توان به تشکیل منافذ بیشتر با اندازه قطر کمتر نسبت داد. تصاویر SEM نیز تأیید کننده ساختار متخلخل و همچنین تشکیل ترکیبات آروماتیک در بیوچارها بود. در بیوچار ۶۰۰ ساختار

فهرست منابع

۱. بهشتی، م.، ح.، علیخانی، ب.، متشرع زاده و ل. محمدی. ۱۳۹۵. تغییرات کیفیت بیوچار تولید شده از کود گاوی در طی فرایند گرماکافت آهسته در دماهای مختلف. مجله تحقیقات آب و خاک. جلد ۳: ۲۴۷-۲۵۹.
2. Agrafiotia, E., G. Bourasa, D. Kalderisb, and E. Diamadopoulousa. 2013. Biochar production by sewage sludge pyrolysis. JAAP. 101: 72-78
3. Bogusz, A. and P. Oleszczuk. 2020. Effect of biochar addition to sewage sludge on cadmium, copper and lead speciation in sewage sludge-amended soil. Chemosphere. 239: 719-726.
4. Breulmann, M., M. Van Afferden, R. A. Muller, E. Schulz, and C. Fuhner. 2017. Process conditions of pyrolysis and hydrothermal carbonization affect the potential of sewage sludge for soil carbon sequestration and amelioration. JAAP. 124: 256-265.
5. Dokht H.F, E. Dordipour, A.M.N. Seyed. 2017. Adsorption and desorption of lead in Iranian acid and alkaline soils amended with sewage sludge-derived biochar. JAEHR. 5: 59-69.

6. Chen, T., Y. Zhang, H. Wang, W. Lu, Z. Zhou, and Y. Zhang. 2014. Influence of pyrolysis temperature on characteristics and heavy metal adsorptive performance of biochar derived from municipal sewage sludge. *Bioresour. Technol.* 164:47-54
7. Fryda, L. and R. Visser. 2015. Biochar for soil improvement: Evaluation of biochar from gasification and slow pyrolysis. *Agriculture*. 5:1076–1115.
8. Huang, H. and Z. Yuan. 2016. The migration and transformation behaviors of heavy metals during the hydrothermal treatment of sewage sludge: A Review. *Bioresour. Technol.* 200:991-998.
9. Jin, J.W., Y.A. Li, J.Y. Zhang, S.C. Wu, Y.C. Cao, P. Liang, J. Zhang, M.H. Wong, M.Y. Wang, S.D. Shan, and P. Christie. 2016. Influence of pyrolysis temperature on properties and environmental safety of heavy metals in biochars derived from municipal sewage sludge. *J. Hazard. Mater.* 320: 417-426
10. Jin, J. M. wang, Y. Cao, S .Wu, P. Liang, Y. Li , J. Zhang, J. Zang, M.H. Hung Wong, S. Shan, and P. Christie. 2017. Cumulative effects of bamboo sawdust addition on pyrolysis of sewage sludge: Biochar properties and environmental risk from metals. *Bioresour. Technol* 228: 218-22
11. Karimi, F., G. Rahimi, Z. Kolahchi, A. Khademi, and J .Nezhad. 2019. Using Industrial Sewage Sludge-Derived Biochar to Immobilize Selected Heavy Metals in a Contaminated Calcareous Soil. *Waste Biomass Valorization*. 11: 2825–2836
12. Khanmohammadi, Z., M. Afyuni, and M.R. Mosaddeghi. 2015. Effect of pyrolysis temperature on chemical and physical properties of sewage sludge biochar. *J.Waste Manag.* 33:275-283
13. Lehmann, J., and S. Joseph. 2015. *Biochar for environmental management: science, technology and implementation*, Routledge.
14. Lu, T., H. Yuan, Y. Wang, H. Huang, and Y. Chen. 2016. Characteristic of heavy metals in biochar derived from sewage sludge Mater Cycles. *Journal of Material Cycles and Waste Management* 18:725–733.
15. Mendez, A., M. Terradillos, and G. Gasco. 2013. Physicochemical and agronomic properties of biochar from sewage sludge pyrolysed at different temperatures. *JAAP*. 102:124-130
16. Rauret, G., J.F. Lopez-Sanchez, A. Sahuquillo, R. Rubio, C. Davidson, A. Ure, and P. Quevauviller. 1999. Improvement of the BCR three step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials. *JEM*. 1: 57–61.
17. Racek, J., J. Sevcik, T. Chorazy, J. Kucerik and P. Hlavinek. 2020. Biochar–Recovery Material from Pyrolysis of Sewage Sludge: A Review. *Waste Biomass Valorization*. 11:3677–3709.
18. Singh C., S. Tiwari and J. S. Singh, 2020. Biochar: A Sustainable Tool in Soil Pollutant Bioremediation. *Bioremediation of Industrial Waste for Environmental Safety*. 475-494.
19. Song, X.D., X.Y. Xue, D.Z. Chen, P.J. He, and X.H. Dai. 2014. Application of biochar from sewage sludge to plant cultivation: Influence of pyrolysis temperature and biochar-to-soil ratio on yield and heavy metal accumulation. *Chemosphere*. 109: 213–220
20. Tomczyk, A., Z. Sokołowska, and P. Boguta. 2020. Biochar phys[icochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Rev Environ Sci Biotechnol*. 19:191–215
21. Udayaga, W. C., A.Veksha, A. Giannis, G.Lisak, V.W.C. Chang, and T.T. Lim. 2018. Fate and distribution of heavy metals during thermal processing of sewage sludge. *Fuel*. 226, 721-744.

22. Xie, T., B. Y. Sadasivam, K. R. Reddy, C. Wang, and K. Spokas. 2016. Review of the effects of biochar amendment on soil properties and carbon sequestration. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*. 20, 04015013.
23. Yang, X., J. Liu, M. Kim, H. Huang, K. Lu, X. Guo, L. He, X. Lin, L. Che, Z. Ye. and H. Wang. 2016. Environ effect of biochar on the extractability of heavymetals (Cd, Cu, Pb, and Zn) and enzyme activity in soil. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 23:974-984.
24. Yuan, X., L. Leng, H. Huang, X. Chen, H. Wang, Z. Xiao, Y. Zhai, H. Chen, and G. Zeng. 2015. Speciation and environmental risk assessment of heavy metal in bio-oil from liquefaction/pyrolysis of sewage sludge. *Chemosphere*. 120:645–652
25. Zhao, S., C.H. Feng, Y.R. Yang, J.F. Niu, and Z.Y. Shen. 2012. Risk assessment of sedimentary metals in the Yangtze Estuary: new evidence of the relationships between two typical index methods. *J. Hazard. Mater.* 242: 164–172.
26. Zielinska, A., P. Oleszczuk, B. Charmas, J. Skubiszewska-Zieba, and Z. Pasieczna-Patkowska. 2015. Effect of sewage sludge properties on the biochar characteristic. *JAAP*. 112: 201–213.



ارزیابی کارایی تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های طیفی در برآورد رطوبت خاک منطقه

تلو در استان تهران

مرتضی میری^{*}، علی اکبر نوروزی، عبدالنبی عبده کلاهچی و جهانگیر پرهمت

استادیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران، Morteza.miri64@gmail.com

استاد، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران، noroozi.aa@gmail.com

استادیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران، nabi.kolahchi@gmail.com

استاد، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران، porhemmat@scwmri.ac.ir

«مقاله پژوهشی»

دریافت: ۱۴۰۲/۸/۲۷ و پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۱

چکیده

اندازه‌گیری مقادیر رطوبت خاک سطحی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های چرخه آبی، نقش مهمی در مدیریت بهینه منابع آب‌و خاک ایفا می‌کند. هدف پژوهش حاضر ارزیابی دقت شاخص‌های طیفی و تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ در برآورد رطوبت خاک طی دوره ۲۰۲۲-۲۰۲۰ در منطقه تلو است. داده‌های این پژوهش شامل: تصاویر روزانه ماهواره سنتینل-۲، مدل رقومی ارتفاع ۳۰ متر و برداشت‌های میدانی با استفاده از دستگاه TDR برای هفت نقطه می‌باشد. شاخص‌های طیفی موردبررسی شامل: $NDVI^1$ ، $SAVI^2$ ، $NDMI^3$ ، $NDWI^4$ ، $MNDWI^5$ است. بررسی مقادیر رطوبت خاک برداشت‌شده با استفاده از دستگاه TDR در سطح منطقه مورد مطالعه نشان داد که متوسط رطوبت خاک منطقه ۰.۱۴٪ بود. از نظر زمانی، بیشینه مقدار رطوبت خاک ثبت شده در ۱۹ آذرماه ۱۳۹۹ با مقدار ۴۰٪ و کمینه مقدار آن در اوایل تیرماه ۱۴۰۰ با مقدار ۱/۳٪ ثبت گردیده است. محاسبه شاخص‌های طیفی نشان داد که از نظر مکانی، جنوب شرق منطقه مورد مطالعه از مقدار رطوبت و سبزی‌نگی بالاتری برخوردار بود. بررسی روند مقادیر رطوبت خاک و مقادیر شاخص‌های طیفی ثبت شده نشان داد که همانند بسیاری از نقاط کشور، طی فصل گرم به‌تبع از شرایط بارشی و دمایی در این منطقه نیز، از یک طرف به دنبال افزایش دما و تبخیر و از طرف دیگر کاهش بارش، کمترین مقادیر رطوبت خاک، و در فصل سرد سال با شروع دوره بارشی منطقه و کاهش دما، بیشترین مقادیر رطوبت خاک ثبت می‌شود. بررسی ارتباط مقادیر رطوبت خاک ثبت شده با استفاده از دستگاه TDR با شاخص‌های طیفی محاسبه‌شده بر روی تصاویر سنتینل-۲ نشان داد که بین شاخص‌های $NDVI$ و $SAVI$ با مقادیر رطوبت خاک TDR ارتباط بسیار ضعیفی وجود داشت و برای شاخص‌های $NDWI$ با مقدار همبستگی ۰.۲۳/۰، $NDMI$ با مقدار ۰.۳۵/۰ و شاخص $MNDWI$ با مقدار همبستگی ۰.۵۹/۰ به ترتیب بیشترین ارتباط برقرار بود.

کلمات کلیدی: دستگاه TDR، داده‌های ماهواره سنتینل، $MNDWI$ ، آب خاک

* آدرس ایمیل نویسنده مسئول Morteza.miri64@gmail.com



¹ Normalized Difference Vegetation Index

² Soil Adjusted Vegetation Index

³ Normalized Difference Moisture Index

⁴ Normalized Difference Water Index

⁵ Modified Normalized Difference Water Index

مقدمه

رطوبت خاک یک از مهم‌ترین متغیرهای ژئوفیزیکی برای توصیف سطح زمین (لیا و همکاران، ۲۰۱۶) و یک متغیر آب و هواشناسی کلیدی در بسیاری از فرآیندها و مدل‌سازهای هیدرولوژی است (ژائو و هان، ۲۰۱۷؛ دمسار، ۲۰۱۵). رطوبت خاک فرآیندهای مختلف هیدرو اقلیم، هیدرو هواشناسی، زیست‌محیطی، بیوژئوشیمیایی را در مقیاس‌های مختلف مکانی و زمانی کنترل می‌کند (چن و همکاران، ۲۰۱۳). از این رو اندازه‌گیری دقیق رطوبت خاک و آگاهی از رفتار این پارامتر اهمیت شایانی در مطالعات گوناگون همچون هیدرولوژی، کشاورزی (بغدادی و همکاران، ۲۰۰۷)، اقلیم‌شناسی و هواشناسی (انتخابی و همکاران، ۱۹۹۶؛ پراتولا و همکاران، ۲۰۱۴)، علوم خاک، اکولوژی و زراعت (لانت و همکاران، ۲۰۰۵)، جنگلداری و مهندسی منابع آب (مکونن، ۲۰۰۹)، تبادل جریان انرژی و آب بین سطح زمین و اتمسفر (وانگ و همکاران، ۲۰۰۹) دارد.

با وجود اهمیت برداشت دقیق این پارامتر و همچنین نیازمندی به داده‌های رطوبت خاک در بسیاری از مطالعات مختلف، ثبت این پارامتر در بسیاری از مناطق به‌ویژه مناطق کمتر توسعه‌یافته، مناطق کوهستانی و بیابانی توسط ایستگاه‌های زمینی با فاصله مکانی زیاد و عدم توزیع یکنواخت انجام می‌شود. مشاهدات میدانی هرچند امکان اندازه‌گیری رطوبت خاک در اعماق مختلف را فراهم می‌کند، اما پوشش مکانی و زمانی محدودی دارد و در هر شبکه نیاز است که از ابزارها و تکنیک‌های مختلف واسنجی همراه با صرف هزینه‌های زیاد استفاده شود (هاوسر و همکاران، ۱۹۹۸؛ یوان و کوپرینگ، ۲۰۱۷). افزون بر دشواری و بعضاً غیرممکن بودن اندازه‌گیری رطوبت خاک به شکل مستقیم، اندازه‌گیری‌های میدانی تنها معرف یک

نقطه و یک زمان می‌باشند که غالباً میانگین اندازه‌گیری‌ها به‌عنوان مشخصه رطوبتی یک ناحیه استفاده می‌شود. این میانگین به‌ندرت اطلاعاتی را که معرف دیگر مشخصه‌های هیدرولوژیکی مانند رواناب باشد را در اختیار می‌گذارند (انگمن و گودنی، ۱۳۸۳). این ویژگی‌ها سبب شده است که استفاده از روش میدانی با چالش‌های بیشتر همراه باشد. از این رو طی دهه‌های اخیر پژوهشگران مختلف برای رفع این مشکلات از داده‌های ماهواره‌ای و داده‌های شبکه‌ای برای برآورد رطوبت خاک استفاده می‌کنند. گووارد و همکاران (۲۰۰۲) در فرانسه با کاربرد داده‌های سنجنش از دور نشان دادند که شاخص TVX^6 ، با استفاده از مدل $SSiB^7$ ، قادر به برآورد شرایط رطوبتی خاک می‌باشد. وانگ (۲۰۰۵)، رابطه بین رطوبت مشاهده شده و $NDVI$ حاصل از تصاویر ماهواره مودیس را در منطقه‌ای نیمه‌خشک از کشور آمریکا بررسی کرد و رابطه خوبی بین این دو پارامتر در منطقه توسعه ریشه به دست آورد. ژائو و همکاران (۲۰۱۰) در چین از مقایسه‌ی نتایج میدانی رطوبت خاک با مقادیر برآورد شده و کاربرد تصاویر ماهواره مودیس، به یک مدل لگاریتمی دست یافتند که قادر است در اراضی با پوشش گیاهی ضعیف، رطوبت را با کاربرد شاخص‌های LST^8 و $NDVI$ تصاویر مودیس، با دقت قابل قبولی برآورد کند. سانچز و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از ۴ شاخص $NDVI$ ، $NDMI$ ، LST و BT^9 با کمک ترکیبی از دو سری داده دورسنجی شامل داده‌های مایکروویو $SMOS$ و داده‌های مادون‌قرمز کوتاه و مادون‌قرمز نزدیک از ماهواره مودیس رطوبت سطحی خاک در منطقه‌ای از اسپانیا را موردبررسی قرار دادند. نتیجه‌ی این بررسی منجر به ارتباط قابل قبولی بین رطوبت خاک و داده‌های سنجنش از دور شد. آیهو و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از تصاویر سنتینل ۱ و استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان رطوبت

⁶ the Temperature/Vegetation index⁷ the Simplified Simple Biosphere⁸ Land Surface Temperature⁹ Brightness Temperature

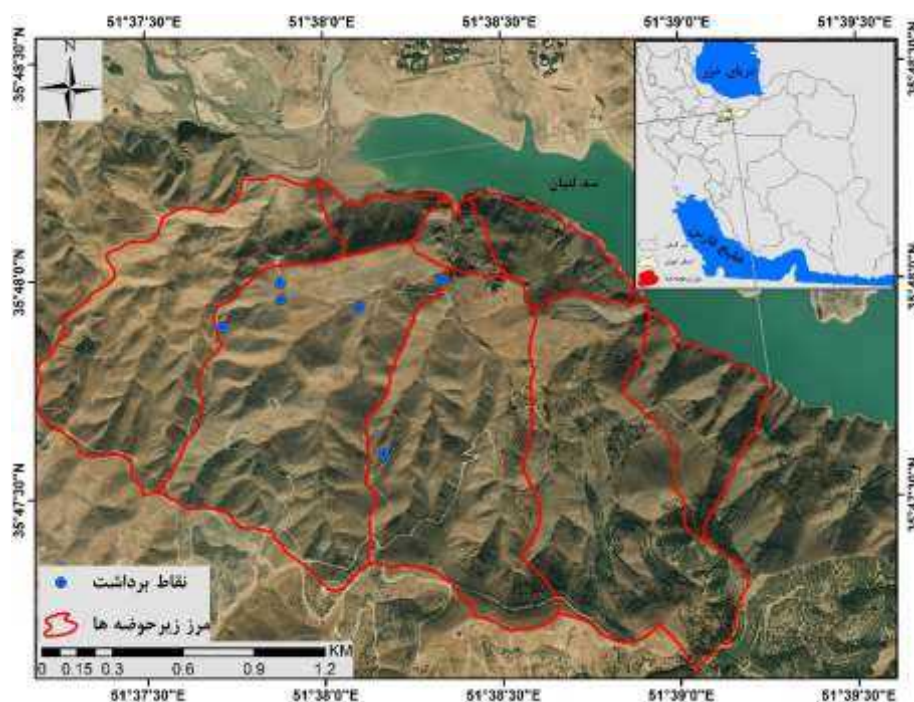
خاک حوضه نیل در محدوده کشور اتیوپی را برآورد کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که ترکیبی از داده‌های سنتینل، شاخص NDVI و متغیرهای ارتفاعی قابلیت برآورد رطوبت خاک را با دقت قابل قبول دارند. بابازاده و همکاران (۱۳۹۱) امکان برآورد رطوبت سطحی خاک را با استفاده از ۳ شاخص NDVI، دمای درخت‌پوشی و دمای سطح زمین و تصاویر مودیس در استان خراسان رضوی را مطالعه و نشان دادند که همبستگی معنی‌داری بین NDVI و دمای سطح زمین با رطوبت سطحی خاک وجود دارد. خانمحمدی و همکاران (۱۳۹۲) در پژوهشی با استفاده از تصاویر ماهواره مودیس و به کمک شاخص‌های پوشش گیاهی و دمای سطح خاک اقدام به برآورد رطوبت خاک در شهرستان ورامین کردند. نتایج آن‌ها نشان داد بین مقادیر رطوبت خاک سطحی با شاخص‌های NDVI، NDMI و LST همبستگی معناداری وجود دارد. دادرسی سبزواری و همکاران (۱۳۹۴) مدل‌سازی رطوبت سطحی خاک در حوزه ریوند با استفاده از داده‌های سنجنش‌ازدوری (لندست ۸) را انجام و نتایج آن‌ها نشان داد که تصاویر ماهواره‌ای، توانایی مناسبی برای برآورد رطوبت سطحی خاک دارند. رنجبر و آخوند زاده هنزائی (۱۳۹۸) با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل ۱ و ۲ و روش‌های شبکه عصبی مصنوعی چندلایه پرسپترون، روش رگرسیون بردار و مدل‌های داده محور، رطوبت حجمی سطح خاک ایالت مانیتوبا کانادا را برآورد کردند. نتایج نشان داد که تصاویر سنتینل ۱ از دقت بیشتری در برآورد رطوبت خاک برخوردارند. استفاده از داده‌های رطوبت خاک مدل‌های شبکه‌ای و همچنین دورسنجی با دقت مکانی و زمانی مناسب برای کشوری همانند ایران که با کمبود شبکه ایستگاهی برای برآورد این پارامتر مواجه است و همچنین به دلیل

گسترده‌ی وسعت کشور و وجود مناطق مرتفع و بیابانی زیاد که فاقد ایستگاه ثبت داده‌های هیدرو اقلیم می‌باشند (میری، ۱۳۹۵)، برای بررسی تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک از اهمیت زیادی برخوردار است. چنانچه بتوان ارتباط مناسبی بین داده‌های رقومی ماهواره و رطوبت خاک برقرار نمود، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای قابلیت این را دارد که، برآورد رطوبت خاک را در سطح گسترده تسهیل، ارزان و سریع نماید. همچنین تعیین وضعیت رطوبتی خاک، اهمیت فراوانی در مطالعات حفاظت خاک دارد (بهمنی و رضائی، ۱۳۹۳) که با تسهیل در محاسبه‌ی رطوبت خاک و استفاده‌ی گسترده‌تر از این پارامتر در مطالعات حوزه‌های آبخیز، نخستین گام در حفاظت منابع آب و خاک در حوزه‌های آبخیز برداشته می‌شود. ازاین‌رو در این پژوهش سعی بر این شده است که با ترکیبی از مطالعات میدانی، تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ و تکنیک‌های سنجنش‌ازدوری، دقت تصاویر ماهواره‌ای سنتینل و شاخص‌های طیفی مختلف در برآورد رطوبت خاک منطقه تلو در استان تهران موردبررسی و ارزیابی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش

محدوده مورد مطالعه تلو به مساحت ۳۲۸ هکتار در محدوده $35^{\circ} 15' 15''$ تا $35^{\circ} 39' 17''$ عرض شمالی قرار دارد. از نظر سیاسی، محدوده مطالعاتی در استان تهران و در شهرستان‌های تهران و شمیرانات واقع گردیده است. (شکل ۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان تهران و ایران را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و توزیع مکانی سنسورهای TDR

داده‌ها

۲۰۲۰ الی ژانویه ۲۰۲۲)، تصاویر ماهواره سنتینل ۲ در سطح پردازشی L2A و LC1، تصاویر ذخیره شده در سامانه گوگل ارث و داده‌های فیزیوگرافی منطقه مورد مطالعه می‌باشد. جدول ۱ مشخصات جغرافیایی نقاط نصب سنسورهای TDR در سطح حوضه تلو را نشان می‌دهد.

داده‌های مورد استفاده برای انجام این پژوهش دربرگیرنده داده‌های برداشت شده با استفاده مطالعات میدانی و سنسور TDR در عمق صفر تا ۱۵ سانتی متری سطح زمین طی مهرماه ۱۳۹۹ لغایت دی‌ماه ۱۴۰۰ (سپتامبر

جدول ۱- موقعیت سنسورهای TDR نصب شده در منطقه مورد مطالعه

نام ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع
نقطه ۱	۳۵/۸۰	۵۱/۶۳	۱۷۰۳
نقطه ۲	۳۵/۸۰	۵۱/۶۳	۱۷۳۲
نقطه ۳	۳۵/۸۰	۵۱/۶۳	۱۷۱۰
نقطه ۴	۳۵/۸۰	۵۱/۶۳	۱۷۷۹/۸
نقطه ۵	۳۵/۸۰	۵۱/۶۳	۱۷۷۹/۸
نقطه ۶	۳۵/۷۹	۵۱/۶۴	۱۷۹۴
نقطه ۷	۳۵/۸۰	۵۱/۶۴	۱۶۸۰

روش کار

برای رسیدن به هدف پژوهش ترکیبی از روش‌های میدانی، آماری و سنجش‌ازدوری استفاده شد. در ابتدا مقادیر رطوبت خاک ثبت شده توسط هفت سنسور رطوبت‌سنج TDR طی دوره مورد بحث دریافت و از نظر کمی و کیفی پردازش شد. طی دوره مورد بحث تعداد ۳۱ برداشت رطوبت خاک برای هر نقطه با استفاده از سنسورهای TDR انجام شد. قابل ذکر است که با توجه به

همچنین در (شکل ۱) پراکنش جغرافیایی این نقاط نشان داده شده است. همان‌طور که روی نقشه مشخص است سعی بر این شد که دستگاه‌ها با پراکنش مناسب جغرافیایی در سطح حوضه نصب شوند. مسیرهای دسترسی، ویژگی‌های فیزیوگرافی و فاصله از هم معیارهای اصلی در انتخاب محل نصب دستگاه‌ها بوده‌اند.

هدف پژوهش، برداشت‌های زمینی مطابق با زمان گذر ماهواره سنتینل از روی منطقه مورد مطالعه انجام شده است. در ادامه با استفاده از قابلیت‌های تارنمای کوپرنیکوس، تصاویر ماهواره‌ای سنتینل دو در سطح پردازشی L2A و LC1 طی دوره آماری ۲۰۲۰-۲۰۲۲ (مهرماه ۱۳۹۹ لغایت دی‌ماه ۱۴۰۱) برای تمام روزهای برداشت میدانی از نظر وجود تصویر و همچنین کیفیت آن‌ها بررسی شد. با توجه به اینکه در برخی از روزها منطقه تلو تحت تأثیر ابر قرار داشت و تصاویر ماهواره‌ای قابلیت استفاده نداشت، از این رو سعی بر این شده است که از تصاویر ماهواره‌ای نزدیک به زمان برداشت با کیفیت مناسب استفاده شود. با حذف روزهای ابری در مجموع تعداد ۲۰ تصویر سنتینل-۲ با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر برای هدف مورد مطالعه از وبسایت (<https://scihub.copernicus.eu/>) دریافت و عملیات پیش‌پردازش، پردازش و پس‌پردازش در محیط GIS و استفاده از افزونه Sen2cor در محیط SNAP انجام

شد. در ادامه شاخص‌های طیفی NDWI، NDVI، SAVI، NDMI، MNDWI (جدول ۲) بر روی تصاویر ماهواره‌ای در محیط نرم‌افزاری ENVI5.3 محاسبه و نقشه‌های مربوط برای هر شاخص طی دوره مورد بحث با استفاده از قابلیت‌های نرم‌افزار GIS تهیه شد. قابل ذکر است که در این پژوهش به این دلیل به جای استفاده از مقادیر DN تصاویر، شاخص‌های طیفی محاسبه و استفاده شد که این شاخص‌ها به طور غیرمستقیم با مقادیر آب خاک در ارتباط هستند و در تحلیل و تفسیر نتایج کاربردی‌تر می‌باشند. در نهایت پس از برداشت‌های میدانی و محاسبه شاخص‌های طیفی، با استفاده از آماره‌های آماری R، R²، RMSE ارتباط بین مقادیر شاخص‌های طیفی با مقادیر رطوبت خاک برداشت شده با استفاده از سنسورهای زمینی TDR به منظور تعیین بهترین شاخص طیفی از نظر برآورد رطوبت خاک، محاسبه شد.

جدول ۲- لیست شاخص‌های طیفی مورد استفاده

شاخص Indices	فرمول شاخص Formula	رفرنس Reference
NDVI	$NDVI = (NIR - Red) / (Red + NIR)$	(روس و همکاران، ۱۹۷۴)
SAVI	$SAVI = (1 + L) \times (NIR - Red) / (L + NIR + Red)$	(هیت، ۱۹۸۸)
NDWI	$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR)$	(گانو، ۱۹۹۶)
MNDWI	$MNDWI = (Green - SWIR) / (Green + SWIR)$	(سو، ۲۰۰۶)
NDMI	$NDMI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$	(گانو، ۱۹۹۶)

نتایج

برداشت رطوبت خاک با دستگاه TDR

در (جدول ۳) مقادیر رطوبت خاک برداشت شده با استفاده از TDR در عمق صفر تا ۱۵ سانتی‌متری از سطح زمین منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است. در این جدول سلول‌های خالی بیانگر عدم شرایط مناسب آب و هوایی و سطح زمین برای برداشت رطوبت خاک در کل منطقه مورد مطالعه یا برخی از قسمت‌های آن می‌باشد. در مجموع هفت نقطه، متوسط رطوبت خاک سالانه منطقه مورد مطالعه

با استفاده از برداشت‌های میدانی برابر ۱۴/۰۷ درصد است. از نظر مکانی نقطه شماره چهار در غرب منطقه مورد مطالعه با متوسط ۱۸/۸۶ درصد طی دوره مورد مطالعه از بیشترین مقدار متوسط رطوبت خاک برخوردار بود. از نظر زمانی طی دوره یک‌ساله برداشت، هم‌زمان با فصل مرطوب منطقه مورد مطالعه مقادیر رطوبت خاک با افزایش و طی دوره گرم سال هم‌زمان با افزایش ساعات آفتابی و افزایش میزان تبخیر از سطح زمین مقدار رطوبت سطحی خاک منطقه تلو کاهش پیدا کرده است. همچنین بررسی مقادیر داده‌های

در نقطه شماره ۴ با بالاترین مقدار رطوبت خاک نشان داد که اختلاف رطوبت سطح خاک منطقه طی دوره‌های مرطوب و خشک به ۳۵ درصد می‌رسد. این شرایط بیانگر وابسته بودن مقدار رطوبت خاک منطقه به شرایط اتمسفری و همچنین جریان‌های سطحی ناشی از ذوب برف در اوایل فصل گذر اقلیمی است.

برداشت‌شده نشان داد که بیشترین مقدار رطوبت خاک ثبت‌شده در منطقه مورد مطالعه با استفاده از TDR برای نقطه شماره ۴ در تاریخ ۲۰۲۰/۱۲/۰۹ با مقدار ۴۰ درصد و در مقابل کمترین مقدار رطوبت خاک برای نقطه شماره یک در مرکز منطقه با مقدار ۱/۳ درصد در تاریخ ۲۰۲۱/۰۷/۰۶ ثبت شده است. مقایسه مقادیر رطوبت خاک برداشت‌شده

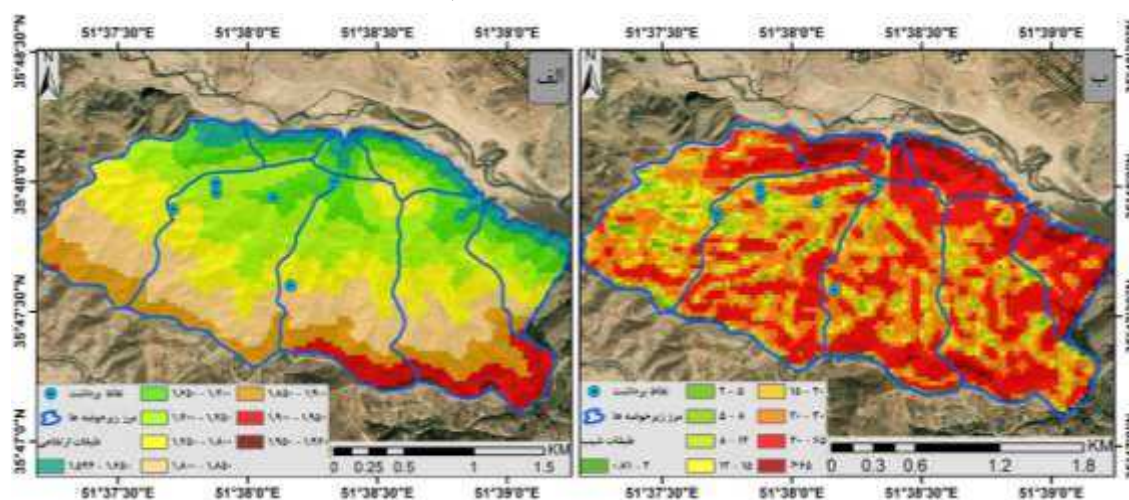
جدول ۳- مقادیر رطوبت خاک برداشت شده با استفاده از دستگاه TDR طی دوره یک‌ساله

تاریخ	نقطه ۱	نقطه ۲	نقطه ۳	نقطه ۴	نقطه ۵	نقطه ۶	نقطه ۷	متوسط
۲۰۲۰-۱۱-۰۲	۸/۶	۹	۹/۳	۱۴	۱۴			۱۰/۹۸
۲۰۲۰-۱۱-۰۹	۹/۵	۱۰	۷	۱۵/۲	۱۲	۱۴/۴		۱۱/۳۵
۲۰۲۰-۱۱-۱۱	۱۲/۵	۱۲/۲	۱۳/۶	۲۲/۵	۱۲/۸	۲۰		۱۵/۶۰
۲۰۲۰-۱۱-۱۵	۳۶	۲۹/۸	۲۹	۳۷/۲	۲۸/۹	۲۹/۴	۳۲/۵	۳۱/۸۳
۲۰۲۰-۱۱-۲۵	۳۲/۳	۳۳	۳۳/۷	۳۷/۵	۳۴	۳۳/۵	۳۴/۲	۳۴/۰۳
۲۰۲۰-۱۲-۰۹	۳۶		۳۶	۴۰	۳۶	۳۵	۳۸	۳۶/۸۳
۲۰۲۰-۱۲-۱۵	۲۱/۴	۲۰	۱۰	۱۵/۸	۱۶/۲		۲۳/۳	۱۷/۷۸
۲۰۲۰-۱۲-۲۱	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵/۰۰
۲۰۲۱-۰۱-۱۳				۵	۲/۵	۲/۵		۳/۳۳
۲۰۲۱-۰۲-۰۳		۱۲/۴		۶	۱۲/۵			۱۰/۳۰
۲۰۲۱-۰۲-۲۱	۱۲	۸	۱۱	۱۲/۶	۴/۲	۲۱/۵		۱۱/۵۵
۲۰۲۱-۰۲-۲۷	۱۳	۱۰	۶	۲۰/۳	۵/۳	۱۶		۱۱/۷۷
۲۰۲۱-۰۵-۰۸		۲۶/۵	۲۸	۳۱	۲۶			۲۷/۸۸
۲۰۲۱-۰۶-۰۱			۱۰/۶۳	۱۱/۵۳	۱۰/۳	۱۶/۰۳		۱۲/۱۲
۲۰۲۱-۰۶-۱۵	۹/۲	۸/۷	۸/۲	۱۲/۳	۹			۹/۴۸
۲۰۲۱-۰۶-۲۶		۶/۵۳	۹/۴	۱۱/۵	۱۰/۴		۱۱	۹/۷۷
۲۰۲۱-۰۷-۰۶	۱/۳	۳/۵	۴	۲	۲		۷/۵	۳/۳۸
۲۰۲۱-۰۷-۱۴	۷	۶/۸	۷	۳۲/۷	۷/۵۳		۷/۵	۱۱/۴۲
۲۰۲۱-۰۷-۲۸	۶/۱	۵	۶/۶	۱۳/۱	۶/۷		۸/۱	۷/۶۰
۲۰۲۱-۰۸-۰۴	۶/۳	۷/۹	۵/۸	۱۲/۵	۶/۵	۸	۹/۱	۸/۰۱
۲۰۲۱-۰۸-۱۰	۷/۵	۶	۷	۳۶	۷/۵	۷/۴	۸/۷	۱۱/۴۴
۲۰۲۱-۰۸-۱۵	۷/۲	۶	۷	۱۹/۶	۵	۹/۲	۸/۶	۸/۹۴
۲۰۲۱-۰۸-۲۵	۷/۱	۶/۲	۶/۸	۱۲	۷	۷	۸	۷/۷۳
۲۰۲۱-۰۹-۰۷	۴/۲	۶/۶	۶/۹	۲۶/۵	۶/۵	۴/۲	۴/۲	۸/۴۴
۲۰۲۱-۰۹-۲۰	۷	۷	۷	۱۵	۶/۱	۷	۷	۸/۰۱
۲۰۲۱-۰۹-۲۸	۶/۸	۷/۱	۶/۱	۱۱/۱	۷/۶	۶/۵	۱۰/۲	۷/۹۱
۲۰۲۱-۱۰-۱۳		۷	۶	۱۱/۴	۶/۴	۷/۸	۹/۳	۷/۹۸
۲۰۲۱-۱۰-۳۰		۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷/۰۰
۲۰۲۱-۱۱-۰۹		۱۸		۳۰	۱۸	۲۲/۵	۲۱	۲۱/۹۰
۲۰۲۱-۱۱-۱۴		۱۰	۱۵	۲۰	۱۹		۲۰	۱۶/۸۰
۲۰۲۱-۱۱-۲۴		۱۲	۱۴	۲۰/۱	۱۵/۵	۱۹	۲۲	۱۷/۱۰
۲۰۲۱-۱۲-۳۰	۲۰	۲۱/۸	۲۲	۲۷	۱۵/۵	۲۷	۲۱	۲۲/۰۴
متوسط	۱۳/۰۰	۱۱/۶۹	۱۲/۲۴	۱۸/۸۶	۱۲/۲۸	۱۵/۲۷	۱۵/۱۵	۱۴/۰۷

ارتفاع و شیب

با توجه به اهمیت مقادیر شیب و ارتفاع در میزان رطوبت سطحی خاک، نقشه طبقات ارتفاعی و شیب منطقه مورد مطالعه بر اساس مدل رقومی ارتفاع ۳۰ متر تهیه گردید (شکل ۲). محدوده مورد مطالعه دارای متوسط ارتفاعی ۱۷۷۴ متر، کمینه ۱۵۹۴ و حداکثر ۱۹۷۰ متر است. از نظر مکانی قسمت‌های شمالی منطقه و نزدیک به سد لتیان از کمینه ارتفاع و قسمت‌های جنوبی از بیشینه ارتفاع برخوردار است. از نظر مقادیر شیب سطح قابل توجهی از

منطقه مورد مطالعه از شیب بیش از ۳۰ درصد برخوردار است. بر اساس نقشه تهیه شده قسمت‌های شمالی و جنوبی منطقه از بیشینه شیب برخوردار است. بررسی مقادیر شیب و ارتفاع نقاط برداشت نشان داد که نقطه شماره شش با ارتفاع ۱۷۹۴ متر و میزان شیب ۲۰ درصد، بیشینه مقدار ارتفاع و شیب و نقطه شماره ۱ با ارتفاع ۱۷۰۳ متر و نقطه شماره دو با شیب ۱/۸۱ درصد کمینه مقدار ارتفاع و شیب را دارند. نقطه شماره چهار که از بیشینه متوسط رطوبت سطحی خاک برخوردار است دارای ارتفاع ۱۷۷۹ متر و شیب ۱۲/۰۹ درصد است.



شکل ۲- الف: طبقات ارتفاعی؛ ب: طبقات شیب

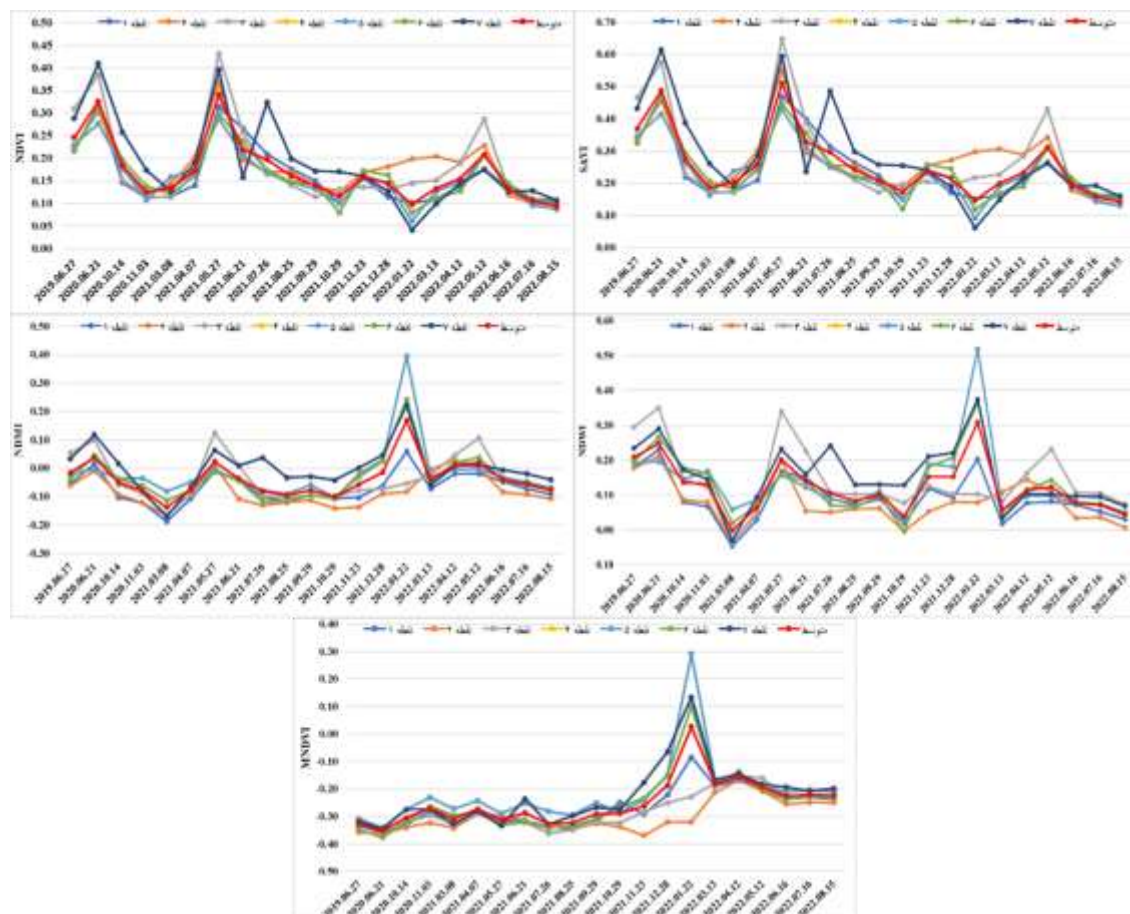
شاخص‌های طیفی

مقادیر شاخص‌های طیفی برای چند تاریخ منتخب طی دوره ۲۰۲۱-۲۰۲۰ در (شکل ۴) نشان داده شده است. بر اساس نتایج حاصل از محاسبه شاخص NDVI در منطقه مورد مطالعه قسمت‌های جنوبی و جنوب شرقی از مقادیر سبزیگی و شادابی بیشتری برخوردارند. از نظر زمانی بیشینه مقدار سبزیگی منطقه برای اواخر اردیبهشت و اوایل خردادماه ثبت شده است. در فصل زمستان منطقه به دنبال برودت هوا و کاهش شدید دما و از بین رفتن پوشش گیاهی کمینه مقدار سبزیگی ثبت می‌شود. یکی از نکات قابل توجه کاهش مقدار سبزیگی پوشش منطقه در سال ۲۰۲۲ نسبت به سال ۲۰۲۰ می‌باشد. به عبارتی دیگر روند سبزیگی و شادابی پوشش منطقه مورد مطالعه کاهشی است. تهیه و بررسی نقشه SAVI منطقه نشان داد که مقدار

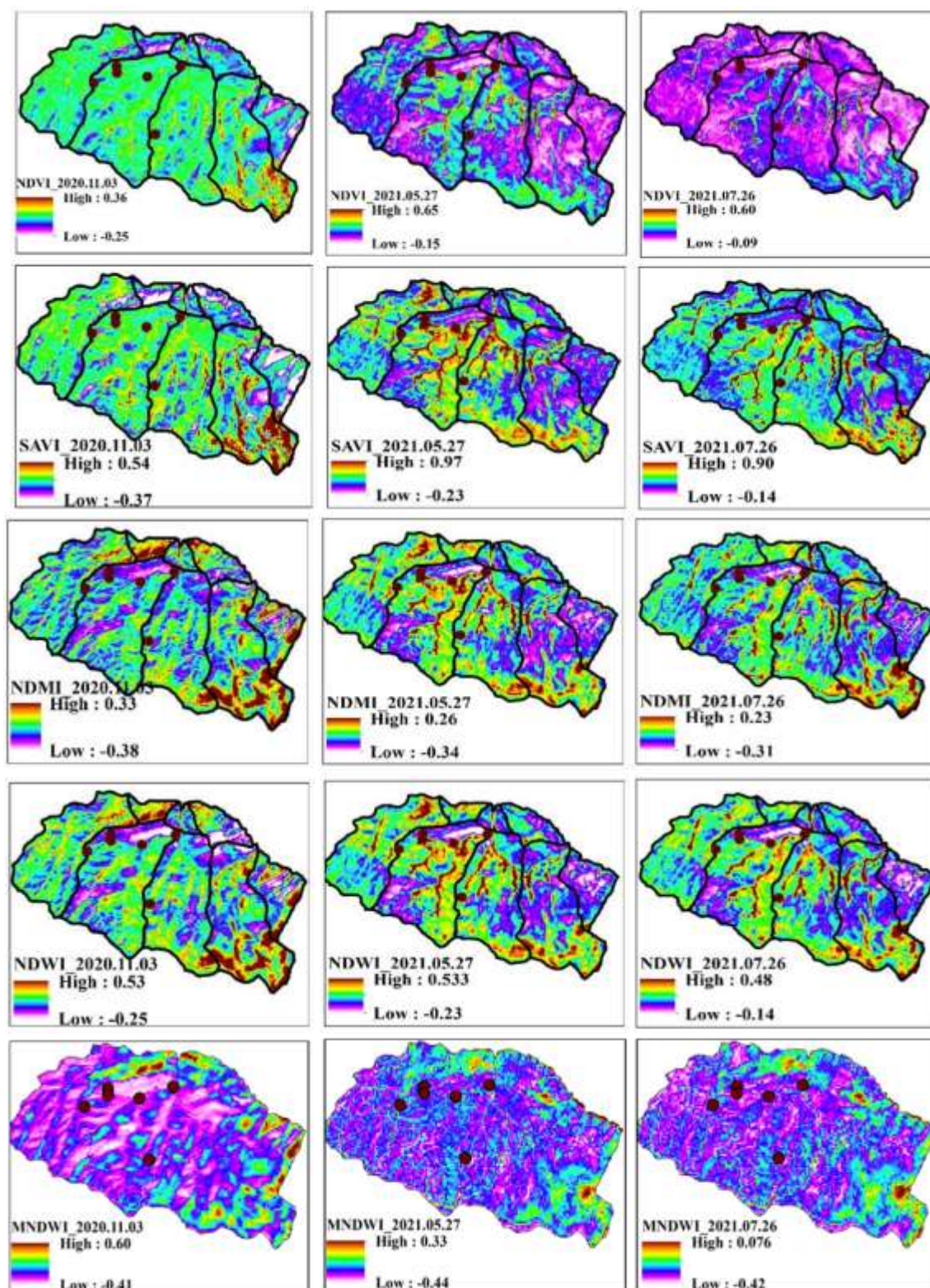
این شاخص نیز همانند شاخص NDVI در مناطق جنوب شرقی و مرکزی منطقه مورد مطالعه به بیشینه مقدار و در شرق و شمال منطقه به حداقل مقدار خود می‌رسد. بررسی مقادیر شاخص تفاضلی نرمال شده رطوبت (NDMI) در سطح منطقه مورد مطالعه نشان داد که همانند دو شاخص گیاهی دیگر نواحی شرقی و شمالی منطقه تلو از کمترین رطوبت و نواحی مرکزی و جنوب شرقی از بیشترین مقدار رطوبت برخوردارند. بر اساس محاسبه این شاخص طی دوره مورد بررسی مقادیر NDMI در قسمت جنوب شرق منطقه قابل توجه است. از نظر زمانی بیشینه مقدار این شاخص برای بهمن‌ماه ۱۴۰۰ با مقدار ۰/۷۳ به دست آمد. نقشه شاخص NDWI نشان داد که همانند شاخص‌های قبلی، از نظر مکانی منطقه جنوب شرق تلو از بیشترین مقدار آب گیاه و شرق و برخی از نواحی شمالی به‌ویژه شمال شرقی از کمینه مقدار این شاخص برخوردارند. از نظر

تفاوت داشته است. از نظر زمانی بیشینه مقادیر این شاخص در اواخر سال ۲۰۲۱ و شروع سال ۲۰۲۲ و کمینه مقدار آن در ۲۰۲۰ و در فصل تابستان ثبت شده است (شکل ۳). کاهش مقادیر این شاخص در فصل تابستان به دنبال کاهش توده گیاهی سطح زمین و همچنین افزایش دما و تبخیر و از طرفی دیگر کاهش بارش است.

زمانی کمینه مقدار این شاخص برای سال ۲۰۲۱ و بیشینه مقدار آن برای سال ۲۰۲۲ به دست آمد. بررسی مقادیر شاخص بهبودیافته MNDWI نشان داد که در سطح منطقه مورد مطالعه طی زمان‌های مختلف نوسان مقادیر آب پوشش گیاهی منطقه با نوسان قابل توجهی همراه است. به‌طوری‌که طی دوره مورد مطالعه مقادیر حداکثر بین ۰/۱۰ تا ۰/۷۸



شکل ۳- روند مقادیر شاخص‌های طیفی طی دوره ۲۰۱۹_۲۰۲۲



شکل ۴- توزیع مکانی مقادیر شاخص‌های طیفی در سطح منطقه تلو با استفاده از تصاویر سنتینل ۲

تصاویر سنتینل ۲ در (جدول ۴) نشان داده شده است. همان‌طور که در (جدول ۴) قابل مشاهده است، ارتباط بین مقادیر رطوبت خاک برداشت توسط TDR با مقادیر تمامی شاخص‌های پوشش گیاهی با شدت و ضعف متفاوت از

ارتباط بین مقادیر TDR و شاخص‌های سنجش‌ازدوری مقادیر شاخص همبستگی بین مقادیر رطوبت خاک اندازه‌گیری شده با استفاده از دستگاه TDR طی زمین‌های مختلف با مقادیر شاخص‌های مختلف دورسنجی روی

نوع مستقیم و مثبت است. با وجود این ارتباط مثبت، اما مقادیر شاخص همبستگی به جزء برای شاخص MNDWI برای سایر شاخص‌ها کمتر از ۰/۵ است به طوری که برای شاخص‌های NDVI و SAVI مقدار ضریب همبستگی به کمتر از ۰/۱۰ می‌رسد که این مقدار از ضریب همبستگی بیانگر ارتباط ضعیف بین مقادیر برداشت‌شده در مطالعات میدانی با مقادیر شاخص‌های طیفی حاصل از تصاویر ماهواره‌ای است. در بین شاخص‌های موردبررسی؛ NDVI، SAVI، NDMI، NDWI و MNDWI بیشترین ارتباط

بین مقادیر رطوبت خاک TDR با شاخص MNDVI به دست آمد. برای این شاخص مقدار همبستگی به ۰/۵۹ و مقدار ضریب تعیین به ۰/۳۵ رسیده است. ارتباط بیشتر بین شاخص‌های طیفی NDWI، NDMI و MNDWI در تحقیقات انجام‌شده در داخل و خارج از کشور نیز همچون مطالعات خانمحمدی و همکاران (۱۳۹۳)، دادرسی‌سبزواری و همکاران (۱۳۹۴)، کوه‌بنانی و یزدانی (۱۳۹۷)، حسینی‌چمنی و همکاران (۱۳۹۸)، سانچز و همکاران (۲۰۱۴) مورد تأکید قرار گرفته است.

جدول ۴- مقادیر آماره‌های مختلف بین مقادیر رطوبت خاک TDR و شاخص‌های دورسنجی

شاخص	R	R ²	RMSE
NDVI	0.04	0.0016	14.74
SAVI	0.02	0.0004	14.6
NDMI	0.35	0.12	14.87
NDWI	0.23	0.05	14.72
MNDWI	0.59	0.35	15.05

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بررسی وضعیت رطوبت خاک منطقه تلو با شرایط توپوگرافی متنوع و شیب بالا در منطقه شمال شرق تهران مبتنی بر استفاده از تصاویر ماهواره‌ای تدوین شده است. بررسی مقادیر رطوبت خاک برداشت‌شده با استفاده از TDR طی زمان‌های مختلف سال برای ۷ نقطه در سطح منطقه نشان داد که برداشت‌های میدانی در این منطقه از تهران به دلیل شرایط خاص توپوگرافی و اقلیمی در تمام زمان‌های سال به‌ویژه فصل سرد سال امکان‌پذیر نیست. از این رو برداشت میدانی با استفاده از TDR برای دوره گرم سال و همچنین در فصل سرد سال در زمان‌های که سطح زمین خشک باشد، برداشت رطوبت خاک با استفاده از TDR و همچنین روش‌های مشابه مانند PR2 و یا برداشت حجم مشخصی از خاک و انتقال آن به آزمایشگاه با محدودیت همراه است؛ بنابراین برای پایش مستمر رطوبت خاک این منطقه و مناطق مشابه باید از دستگاه‌ها و سنسورهای خودکار با قابلیت برخط

بودن ارسال اطلاعات استفاده شود. نتایج پردازش و تجزیه و تحلیل سری زمانی داده‌های رطوبت خاک برداشت‌شده نشان داد که در منطقه تلو همانند سایر نواحی کشور مقادیر رطوبت خاک تابع شرایط محیطی (توپوگرافی، خاک و...) و اقلیمی است؛ چراکه با شروع دوره سرد سال و فصل بارش منطقه در نتیجه فعالیت سامانه‌های بارشی مختلف در سطح منطقه مورد مطالعه مقادیر رطوبت خاک افزایش و در مقابل عبور از فصل گذر اقلیمی و وارد شدن به دور گرم سال و افزایش دماهای حداکثری و به دنبال آن افزایش تبخیر از خاک و کاهش بارش‌ها، مقدار رطوبت خاک ثبت‌شده نیز کاهش پیدا می‌کند. بر اساس مقادیر برداشت‌شده با استفاده از دستگاه TDR حداکثر مقدار رطوبت منطقه تلو طی دوره زمانی موردبررسی در ۱۹ آذرماه ۱۳۹۹ با مقدار ۴۰ درصد ثبت شده است. در مقابل کمینه مقدار آن در اوایل تیرماه ۱۴۰۰ با مقدار ۱/۳ درصد ثبت شده است. محاسبه شاخص‌های طیفی نشان داد که از نظر مکانی جنوب شرق منطقه

MNDWI با مقدار همبستگی ۰/۵۹ به ترتیب بیشترین ارتباط به دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از هر نوع سنسور سنجش از نزدیک مانند TDR و سنجش از دوری مانند ماهواره‌ها نیازمند داده‌های اندازه‌گیری مستقیم زمینی است که با توجه به کمبود داده‌های رطوبت خاک در سطح کشور ایران، ارزیابی دقت داده‌های دورسنجی و همچنین ترکیب داده‌های رطوبت خاک حاصل از تصاویر ماهواره‌ای و شبکه‌ای در کاربری‌های مختلف از اهمیت و ضرورت بالایی برخوردار است.

مورد مطالعه از مقدار رطوبت و سبزینگی بالاتری برخوردار است. بر اساس مشاهدات میدانی دلیل بیشتر بودن مقادیر شاخص‌های طیفی در قسمت جنوب شرقی وجود توده گیاهی قابل توجه در اطراف مسیر رودخانه است. بررسی ارتباط مقادیر رطوبت خاک ثبت شده با استفاده از دستگاه TDR با شاخص‌های طیفی محاسبه شده بر روی تصاویر سنتینل ۲ نشان داد که بین شاخص‌های NDVI و SAVI با مقادیر رطوبت خاک TDR ارتباط مشخص و معناداری وجود ندارد و برای شاخص‌های NDWI با مقدار همبستگی ۰/۲۳، NDMI با مقدار ۰/۳۵ و شاخص

فهرست منابع

۱. انگمن، ای تی و گودنی، آر جی. ۱۳۸۳. سنجش از دور در هیدرولوژی، ترجمه فاتحی مرج، ا؛ و حافظی، س. انتشارات پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، ۱۹۹ ص.
۲. بابازاده، ح.، نوروزی اقدام، ا.، عقیقی، ح.، شمس‌نیا، س.ا. و خدادادی دهکردی، د. ۱۳۹۱. تخمین رطوبت لایه سطحی خاک اراضی مرتعی مناطق خشک و نیمه خشک با استفاده از شاخص دما و پوشش گیاهی، مطالعه موردی: استان خراسان، فصلنامه تحقیقات مرتع و بیابان ایران، جلد ۱۹، شماره ۱، ص ۱۲۰-۱۳۲.
۳. بابائیان، ا.، همایی، م و نوروزی، ع.ا. ۱۳۹۲. اشتقاق و اعتبارسنجی توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای در گستره VIS-NIR-SWIR به منظور تخمین نگهداشت آب در خاک. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال دوم، شماره ۳، ص ۲۷-۴۰.
۴. بهمنی، ا و رضائی، ب. ۱۳۹۳. ارزیابی عملکرد توابع انتقالی برای برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی خاک‌های مختلف با مدل SWRC. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، ۲۸(۴)، ص ۷۷۳-۷۸۵.
۵. خانمحمدی، ف.، همایی، م و نوروزی، ع.ا. ۱۳۹۲. برآورد رطوبت خاک به کمک شاخص‌های پوشش گیاهی و دمای سطح خاک و شاخص نرمال شده رطوبت با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS، حفاظت منابع آب و خاک، ۴(۳)، ص ۳۷-۴۵.
۶. دادرسی سبزواری، ا.، آخوندعلی، ع.م.، رادمنش، ف و نوروزی، ع.ا. ۱۳۹۴. مدل سازی سطوح مختلف رطوبت خاک سطحی در گستره‌ی داده‌های حرارتی و انعکاسی، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۴(۳)، ص ۳۱-۴۹.
۷. کوه‌بنانی، ح.م و یزدانی، م.ر. ۱۳۹۷. پهنه‌بندی رطوبت خاک سطحی با استفاده از تصاویر لندست ۸ (مطالعه موردی: حومه شهر سمنان)، جغرافیا و پایداري محیط، ۳(۸)، ص ۶۵-۷۷.
۸. میری، م، ۱۳۹۵. واکاوی ارتباط تغییر اقلیم و زوال جنگل‌های زاگرس مطالعه موردی: منطقه‌ی ایلام، رساله دکتری، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران. ۱۲۵ ص.
9. Ayehu, G., Tadesse, T., Gessesse, B., and Y. Yigrem. 2019. SoilMoisture Monitoring Using Remote Sensing Data and a Stepwise-Cluster Prediction Model: The Case of Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. Remote Sensing, 11(2):125.

10. Baghdadi, N., Aubert, M., Cerdan, O., Franchisteguy, L., Viel, C., Martin, E., Zribi, M. and J.F. Desprats. 2007. Operational mapping of soil moisture using synthetic aperture radar data: application to the Touch Basin (France). *Sensors*. 7: 2458-2483.
11. Chen, Y., Yang, K., Qin, J., Zhao, L., Tang, W., and M. Han. 2013, Evaluation of AMSR-E retrievals and GLDAS simulations against observations of a soil moisture network on the central Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 118: 4466–4475.
12. Demsar, U. 2005. a strategy for observing soil moisture by remote sensing in the Murray-Darling basin. Paper presented at AGILE 2005, Estoril, Portugal.
13. Entekhabi, D., Rodriguez-Iturbe, I., and F. Castelli. 1996. Mutual interaction of soil moisture state and atmospheric processess. *Journal of Hydrology*. 184: 3–17.
14. Goward, S. N., Xue, Y., and K.P. Czajkowski. 2002. Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature/vegetation index measurements: An exploration with the simplified simple biosphere model. *Remote Sensing of Environment*. 79(2–3): 225–242.
15. Houser, P.R., Shuttleworth, J., Famiglietti, J.S., Gupta, H.V., Syed, K.H., and D.C. Goodrich. 1998. Integration of soil moisture remote sensing and hydrologic modeling using data assimilation. *Water Resources Research*. 34(12): 3405–3420.
16. Li, J., and S. Islam. 2002. Estimation of root zone soil moisture and surface fluxes partitioning using near surface soil moisture measurements. *Journal of Hydrology*. 259:1–14.
17. Lunt, L.A., Hubbard, S.S., and Y. Rubin. 2005. Soil moisture content estimation using ground penetrating radar reflection data. *Journal of Hydrology*. 307: 254-269.
18. Mekonnen, D.F. 2009. Satellite remote sensing for soil moisture estimation: Gumara Catchment, Ethiopia. MSc. Thesis of Geo-Information Science and Earth Observation, Specialisation: (Integrated Watershed Modelling and Management). WREM Department of ITC, Enschede, the Netherlands. 120 pages.
19. Rebel, K.T., de Jeu, R.A.M., Ciais, P., Viovy, N., Piao, S.L., Kiely, G., and A.J. Dolman. 2012. Global analysis of soil moisture derived from satellite observations and a land surface model. *Hydrology and Earth System Sciences*. 16: 833–847.
20. Sanchez R., S., Piles, M., Snchez, N., Martínez-Fernández, J., Vall-llossera, M., and A. Camps. ۲۰۱۴. Combining SMOS with visible and near/shortwave/thermal infrared satellite data for high resolution soil moisture estimates. *Journal of Hydrology*. ۵۱۶: ۲۷۳–۲۸۳.
21. Wang, L., and J. Qu. 2009. Satellite remote sensing applications for surface soil moisture monitoring. *Earth Science*. 3: 237-247.
22. Wang, X. ۲۰۰۵. Relation between ground-based soil moisture and satellite image–based NDVI. Earth and Environmental Science Department, University of Texas at San Antonio, ۱۷ Pages.
23. Yuan, S., and S.M. Quiring. 2017. Evaluation of soil moisture in CMIP5 simulations over the Contiguous United States using in situ and satellite observations. *Hydrology Earth System*. 21: 2203–2218.
24. Zhao, S., Yang, Y., Qiu, G., Qin, Q., Yao, Y., Xiong, Y., and C. Li. ۲۰۱۰. Remote detection of bare soil moisture using a surface-temperature-based soil evaporation transfer coefficient. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 12(5): ۳۵۱–۳۵۸.
25. Zhuo, L., and D. Han. 2017, Hydrological Evaluation of Satellite Soil Moisture Data in Two Basins of Different Climate and Vegetation Density Conditions. *Advances in Meteorology*. DOI: 10.1155/2017/1086456.



ارزیابی روش‌های نمره‌دهی و وزن‌دهی ویژگی‌های خاک برای تعیین کیفیت آن در کاربری‌های مختلف

فاطمه سمیع خشک‌اسطلخی، نفیسه یغمائیان*، سپیده ابریشم‌کش و عطااله مصلحت‌جو

دانشجوی دکتری گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان؛ fatemehsamie727@gmail.com

دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان؛ yaghmaeian_na@guilan.ac.ir

استادیار گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان؛ sabrishamkesh@guilan.ac.ir

کارشناس ارشد آبخیزداری، اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گیلان؛ yaghmaeiann_na@guilan.ac.ir

«مقاله پژوهشی»

دریافت: ۱۴۰۲/۱/۱۹ و پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۰

چکیده

جنگل‌ها نقش مهمی در پایداری زیست‌بوم دارند و جنگل‌تراشی یکی از عوامل کاهش کیفیت خاک به شمار می‌آید. در این پژوهش، با بهره‌گیری از تحلیل‌های چند متغیره، شاخص کیفیت خاک در سه کاربری جنگل، مرتع و زراعی در منطقه سی‌دشت استان گیلان ارزیابی شد. ۲۰ نمونه خاک مرکب از هر کاربری و از دو عمق ۱۰-۲۰ و ۲۰-۱۰ سانتی‌متر برداشت شد. شاخص تجمعی وزنی کیفیت خاک با استفاده از آنالیز تجزیه به مولفه‌های اصلی و دو گروه (۱) مجموعه داده حداقل (MDS₁) و (۲) مجموعه داده حداقل تصحیح شده (MDS₂)، محاسبه شد. هم‌چنین، دو روش وزن‌دهی (واریانس و سهم هر ویژگی) و نمره‌دهی (خطی و غیرخطی) مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که از نظر شاخص کیفیت خاک، تفاوت بین کاربری‌های اراضی توسط MDS₂ در روش نمره‌دهی غیرخطی بهتر از روش خطی نمایان می‌شود، به‌طوری‌که میانگین شاخص کیفیت خاک در کاربری جنگل و مرتع بیشتر از کاربری زراعی بود. شاخص کیفیت خاک با روش وزن‌دهی واریانس و نمره‌دهی غیرخطی در MDS₂ (SQIW₂-MDS₂-NLS) دارای بالاترین میزان شاخص حساسیت (۳/۱۴) بود. مجموعه داده حداقل تصحیح شده (MDS₂) که شامل ویژگی‌های سیلت، میانگین وزنی قطر خاکدانه، واکنش خاک، کلسیم کربنات معادل و فسفر قابل دسترس بود، با دارا بودن راندمان ۸۰٪ در مقایسه با مجموعه داده حداقل (MDS₁) از کارایی بالاتری برخوردار بود. اولویت‌دهی شاخص‌های کیفیت خاک نشان داد که شاخص کیفیت خاک با روش وزن‌دهی واریانس و نمره‌دهی غیرخطی در MDS₂ (SQIW₂-MDS₂-NLS) اولین رتبه را داشت و این شاخص تغییر در شیوه‌های مدیریتی و وضعیت کلی خاک را بهتر نشان داده و مناسب‌ترین روش در ارزیابی اثر جنگل‌تراشی بر کیفیت خاک در منطقه مورد مطالعه بود.

کلمات کلیدی: شاخص‌های کیفیت خاک، تغییر کاربری اراضی، مجموعه داده حداقل تصحیح شده، جنگل‌تراشی

* آدرس ایمیل نویسنده مسئول: yaghmaeian_na@guilan.ac.ir



مقدمه

کیفیت خاک، ظرفیتی از عملکرد آن در محدوده‌ی زیست‌بوم و کاربری اراضی است؛ به طوری‌که کیفیت محیط‌زیستی و کیفیت زیستی خاک و همچنین قابلیت تولید آن حفظ و موجب بهبود سلامت گیاهان، جانوران و انسان شود (دوران و پارکین، ۱۹۹۴). به دلیل ماهیت پیچیده مفهوم کیفیت خاک، می‌توان با اندازه‌گیری ویژگی‌های مختلف که نمایان‌گر کارکرد خاک هستند به طور غیرمستقیم، کیفیت خاک را استنباط کرد (رئیزی، ۲۰۱۷؛ سیون و همکاران، ۲۰۱۷).

شاخص کیفیت خاک^۱ در سه مرحله (۱) انتخاب ویژگی‌ها، (۲) نمره‌دهی به ویژگی‌های منتخب و (۳) ادغام ویژگی‌ها در یک شاخص نهایی حاصل می‌شود (کارلن و همکاران، ۲۰۰۳). به طور معمول در بررسی کیفیت خاک ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک به دو صورت مجموعه کل داده^۲ و مجموعه داده حداقل^۳ در نظر گرفته می‌شوند و در اکثر موارد به منظور صرفه‌جویی در هزینه و وقت، برخی ویژگی‌های خاک به عنوان مجموعه داده حداقل، برای محاسبه شاخص کیفیت خاک در نظر گرفته می‌شود (زراعت‌پیشه و همکاران، ۲۰۲۰). یکی از محدودیت‌های ارزیابی کیفیت خاک عدم وجود یک روش پذیرفته شده جامع برای توسعه شاخص‌های کیفیت خاک است. در حال حاضر، شاخص‌های جدید بیش از حد توسعه یافته‌اند، که به نظر می‌رسد محلی و غیر قابل توجه است. بنابراین محققان باید قبل از توسعه شاخص‌های جدید تاکید بیش‌تر بر ارزیابی شاخص‌های موجود داشته باشند (چی و همکاران، ۲۰۰۹). همچنین فقدان مولفه‌هایی که معرف خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و

بیولوژیکی خاک باشند، حساسیت آن‌ها را به تغییرات کیفیت خاک کاهش خواهد داد و منجر به نتایج غیردقیق می‌شود؛ بنابراین انتخاب مجموعه‌های محدود و قابل تفسیر شاخص‌های کیفیت خاک نیاز به مطالعه بیش‌تر دارد (یو و همکاران، ۲۰۱۸).

شیوه‌های مدیریت کشاورزی و تغییر کاربری اراضی از عوامل تاثیرگذار بر کیفیت خاک هستند (مارزائولی و همکاران، ۲۰۱۰). در نتیجه درک روابط بین تغییرات کاربری اراضی و کیفیت خاک ضروری است (داوری و همکاران، ۲۰۲۰). توسعه کشاورزی و رشد جمعیت از جمله مواردی است، که باعث بهره‌برداری بی‌رویه زیست‌بوم‌های کشاورزی و تغییر کاربری اراضی از زیست‌بوم‌های طبیعی مانند جنگل‌ها و مراتع به اراضی کشاورزی می‌شود (رحمانی‌پور و همکاران، ۲۰۱۴). جنگل‌تراشی مهم‌ترین عامل تخریب خاک است زیرا می‌تواند باعث تشدید مسائل تغییر اقلیم و امنیت آب و غذا شود (رضاپور و علی‌پور، ۲۰۱۷). تقاضای فعلی برای محصولات کشاورزی، تبدیل مداوم جنگل به زمین کشاورزی را گسترش می‌دهد که تأثیر منفی قابل توجهی بر کیفیت خاک دارد (بخشنده و همکاران، ۲۰۱۹). ارزیابی ویژگی‌های خاک سطحی، بسیار معمول و آسان است اما در مقایسه با عمق زیرسطحی خاک، اطلاعات ناقصی از کارکرد خاک را ارائه می‌دهد. ارزیابی ویژگی‌های زیرسطحی کیفیت خاک، جهت شناسایی ویژگی‌های موثر بر کارکرد پایه خاک، کمک خواهد کرد (سانتوس-فرانسیس و همکاران، ۲۰۱۹).

سلمی و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از شاخص تجمعی ساده کیفیت خاک^۴، شاخص تجمعی وزنی کیفیت خاک^۵ با دو روش وزن‌دهی (واریانس و سهم هر ویژگی) و

1. Soil quality index (SQI)

2. Total data set (TDS)

3. Minimum data set (MDS)

4. Additive soil quality index (SQI_a)

5. Weighted additive soil quality index (SQI_w)

داشته و از آنجایی که اراضی تغییر یافته، نیازمند شیوه‌های مدیریتی خاصی هستند، شناسایی خاک‌های با کیفیت پایین ضرورت دارد (بخشنده و همکاران، ۲۰۱۹؛ نبی‌الهی و همکاران، ۲۰۱۸). بنابراین مطالعه حاضر با هدف بررسی اثر جنگل‌تراشی بر کیفیت خاک با استفاده از تحلیل‌های چند متغیره و همچنین تعیین مناسب‌ترین شاخص کیفیت خاک، مناسب‌ترین روش انتخاب ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک، روش وزن‌دهی و نمره‌دهی در منطقه سی‌دشت استان گیلان انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه، نمونه‌برداری و تجزیه‌های آزمایشگاهی

در این مطالعه، اراضی واقع در روستای سی‌دشت که به فاصله ۲۰ کیلومتری از شهرستان توتکابن و در عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۵۰ دقیقه و ۱۰ ثانیه شمالی و طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۳۹ دقیقه و ۱۵ ثانیه شرقی در جنوب استان گیلان قرار دارد، مورد مطالعه قرار گرفت. متوسط بارندگی سالیانه در منطقه ۹۵۷ میلی‌متر و متوسط دمای سالیانه ۱۸/۶ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. رژیم رطوبتی و حرارتی خاک منطقه به ترتیب، زریک و ترمیک می‌باشد (بنایی، ۱۳۷۷) و دارای مواد مادری آهکی و تیپ اراضی تپه ماهوری و فلات است.

جهت بررسی اثر جنگل‌تراشی، نمونه‌برداری خاک (۲۰ نمونه خاک مرکب از هر کاربری) از کاربری جنگل به عنوان کاربری شاهد با پوشش جنگلی بلوط (*Quercus castaneifolia*) و انجیلی (*Parrotiapersica*)، کاربری زراعی با کشت دیم گندم (با سابقه‌ای حدود ۵۰ سال)، و کاربری مرتع از دو عمق صفر تا ۱۰ و ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متری هر سه کاربری انجام شد. نمونه‌های خاک هوا خشک شده به دو صورت دست‌خورده عبور از الک ۲

شاخص کیفیت نمورو خاک^۱ بر اساس TDS و MDS به ارزیابی کیفیت خاک در مصر پرداختند. نتایج آن مطالعه نشان داد که شاخص تجمعی وزنی کیفیت خاک مبنی بر روش وزن‌دهی واریانس، از شاخص حساسیت^۲ بالاتری برخوردار بود و در مقایسه با سایر شاخص‌های مورد مطالعه در محاسبه شاخص کیفیت خاک مناسب‌تر است. در پژوهشی ژو و همکاران (۲۰۲۲) کیفیت خاک شمال شرقی چین را بر اساس TDS و MDS حاصل از آنالیز تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و با استفاده از شاخص‌های SQI_w و SQI_n (وزن‌دهی مبنی بر واریانس) در عمق‌های ۰-۱۰، ۱۰-۲۰ و ۲۰-۳۰ سانتی‌متر مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که SQI_w بر اساس MDS در دو عمق ۰-۱۰ و ۱۰-۲۰ سانتی‌متر در مقایسه با سایر شاخص‌های کیفیت خاک از شاخص حساسیت و نسبت کارایی^۳ (نسبت تعداد همبستگی‌های معنی‌دار بین شاخص کیفیت و ویژگی‌های خاک به تعداد ویژگی‌های خاک) بالاتری برخوردار بود. نتایج پژوهش انجام شده به منظور مقایسه شاخص‌های کیفیت خاک کاربری مرتع در منطقه نیمه خشک شمال غربی ایران نشان داد که شاخص کیفیت نمورو با استفاده از MDS از میزان شاخص حساسیت و نسبت کارایی بالاتری برخوردار است (شیدای کرکچ و همکاران، ۲۰۱۹). همچنین چن و همکاران (۲۰۱۳) نیز به ارزیابی شاخص کیفیت خاک بر اساس مجموعه داده حداقل با روش‌های مختلف در چین پرداختند. نتایج آن مطالعه نشان داد که شاخص تجمعی وزنی حاصل از درصد واریانس در مقایسه با شاخص تجمعی وزنی حاصل از سهم هر ویژگی دارای شاخص حساسیت بالاتری بود.

جنگل‌های هیرکانی شمال کشور از منابع مهم و حیاتی ایران است، درحالی‌که بدون توجه به محدودیت‌های محیط‌زیستی، جنگل‌تراشی گسترده‌ای در این منطقه صورت گرفته است. این امر با خود، کاهش کیفیت خاک را به دنبال

^۳. Efficiency ratio (ER)

^۱. Nemoro quality index (SQI_n)

^۲. Sensitivity index (SI)

میلی‌متری و دست‌نخورده آماده شدند و برخی ویژگی‌های خاک از جمله؛ بافت خاک به روش هیدرومتری (گی و همکاران، ۱۹۸۶)، جرم مخصوص ظاهری به روش کلوخه و پارافین (بلیک و هارتج، ۱۹۸۶)، واکنش خاک و قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره ۱:۲/۵ خاک به آب به ترتیب با دستگاه pH متر و EC سنج (رودس، ۱۹۸۳)، کربن آلی خاک به روش اکسیداسیون تر (والکلی و بلک، ۱۹۳۴)، کلسیم کربنات معادل به روش تیتراسیون (اسپارک و همکاران، ۱۹۹۶)، فسفر قابل استفاده به روش اولسن (اولسن و همکاران، ۱۹۵۴)، نیتروژن کل به روش کج‌لدال (برمنر، ۱۹۶۰)، میانگین وزنی قطر خاکدانه به روش الک تر پس از گذراندن نمونه خاک از الک ۴/۷۶ میلی‌متر از مجموعه الک‌های ۴، ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵ و ۰/۰۵۳ میلی‌متر به مدت ۱۰ دقیقه با دامنه ۳/۱۸ سانتی‌متر و نوسان ۳۰ دور بر دقیقه (کمپر و روزناو، ۱۹۸۶) اندازه‌گیری شدند.

محاسبه شاخص کیفیت خاک

با هدف کاهش تعداد متغیرهای مورد مطالعه و تعیین ویژگی‌هایی که بیش‌ترین تاثیر را در کیفیت خاک دارند از آنالیز تجزیه به مولفه‌های اصلی استفاده شد. مولفه‌های اصلی با ارزش ویژه بزرگ‌تر از یک مشخص شدند و در هر مولفه اصلی، ویژگی‌های دارای بیش‌ترین وزن تعیین گردید؛ سپس ۱۰ درصد بالاترین وزن ویژگی مورد نظر در هر مولفه، به طوری که دارای ضریب همبستگی پایین ($r < 0.6$) و وزن بالاتر بودند به عنوان مجموعه داده حداقل انتخاب شدند (نبی‌اللهی و همکاران، ۲۰۱۸a؛ گوارتس و همکاران، ۲۰۰۶).
گزینش ویژگی‌های مجموعه داده حداقل به دو صورت انجام پذیرفت: به طوری که در روش اول مجموعه داده حداقل (MDS_1) تمام ویژگی‌های خاک مورد آنالیز تجزیه به مولفه

های اصلی قرار گرفت و در روش دوم مجموعه داده حداقل تصحیح‌شده (MDS_2) مجموعه ویژگی‌های فیزیکی و ویژگی‌های شیمیایی خاک به طور مجزا مورد آنالیز تجزیه به مولفه‌های اصلی قرار گرفت (یو و همکاران، ۲۰۱۸a). با توجه به تاکید پژوهش حاضر بر ارتباط بین کیفیت خاک و فرسایش‌پذیری خاک، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بیشتر مورد توجه قرار گرفت. لازم به ذکر است تنفس میکروبی خاک به عنوان یکی از ویژگی‌های زیستی پرکاربرد اندازه‌گیری شد؛ اما مقدار تنفس میکروبی بین کاربری‌های مختلف به لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری نشان نداد. بنابراین به نظر می‌رسد در صورتی که در این مطالعه ویژگی‌های زیستی خاک در نظر گرفته نشود، خللی در نتایج ایجاد نخواهد شد. مطالعات مشابه نیز با تاکید بر کیفیت و فرسایش‌پذیری خاک، تنها از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی استفاده کردند (دنیز، ۲۰۲۰؛ نبی‌اللهی و همکاران، ۲۰۱۸a؛ نبی‌اللهی و همکاران، ۲۰۱۸b).

در این مطالعه از دو روش نمره‌دهی خطی^۱ و نمره‌دهی غیرخطی^۲ استفاده شد. در روش نمره‌دهی خطی، تابع نمره‌دهی بیش‌تر-بهرتر^۳ برای ویژگی‌های میانگین وزنی قطر خاکدانه، کربن آلی، فسفر قابل دسترس، تابع نمره‌دهی کم‌تر-بهرتر^۴ برای ویژگی‌های جرم مخصوص ظاهری، کلسیم کربنات معادل، و هم‌چنین دامنه بهینه^۵ برای رس، سیلت و واکنش خاک در نظر گرفته شد (آرمینز و همکاران ۲۰۱۳؛ دنیز، ۲۰۲۰؛ فتحی‌زاد و همکاران، ۲۰۲۰؛ نبی‌اللهی و همکاران، ۲۰۱۷؛ رضایی و همکاران، ۲۰۲۰؛ واسو و همکاران، ۲۰۱۶؛ زراعت‌پیشه و همکاران، ۲۰۲۰).

(۱)

$$M(x) = \begin{cases} 0.1 & x < x_1 \\ (0.9 \times \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} + 0.1) & x_1 \leq x \leq x_2 \\ 1 & x > x_2 \end{cases}$$

^۴. Less is better

^۵. Optimal range

^۱. Linear scoring (LS)

^۲. Nonlinear scoring (NLS)

^۳. More is better

"و" کم‌تر- بهتر" بسته به این که مقدار ویژگی اندازه‌گیری شده پایین‌تر یا بالاتر از حد بهینه بود، امتیازدهی ویژگی‌ها صورت گرفت. اگر مقدار ویژگی خاک معادل با محدوده بهینه بود، امتیاز آن ویژگی برابر یک در نظر گرفته شد (Armenise et al., 2013).

$$L(x) = \begin{cases} 1 & x < x_1 \\ (1 - 0.9 \times \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}) & x_1 \leq x \leq x_2 \\ 0.1 & x > x_2 \end{cases} \quad (2)$$

پس از انتخاب ویژگی‌های خاک به عنوان MDS و نمره‌دهی آن‌ها جهت محاسبه شاخص کیفیت خاک از شاخص تجمعی وزنی کیفیت خاک استفاده شد (رئسی و کبری، ۲۰۱۶).

$$SQI_w = \sum_{i=1}^N W_i N_i \quad (5)$$

در رابطه ۵، SQI_w شاخص تجمعی وزنی کیفیت خاک، W_i وزن ویژگی‌های خاک است که به دو صورت نسبت سهم^۵ حاصل از تجزیه عامل^۶ به مجموع سهم‌های مورد نظر (w_1) و درصد واریانس حاصل از مؤلفه‌های اصلی استاندارد (w_2) به دست آمدند (رحمانی‌پور و همکاران، ۲۰۱۴؛ رئسی، ۲۰۱۷) و N_i نمره ویژگی‌های خاک می‌باشد. وزن در روش دوم (w_2) از درصد واریانس استاندارد حاصل از مؤلفه‌های اصلی (مقدار کل واریانس مؤلفه برای متغیرهای غیرهمبسته و نسبت مقدار کل واریانس مؤلفه به تعداد متغیرها برای متغیرهای همبسته) به دست آمد.

بنابراین شاخص کیفیت خاک برای هر یک از نمونه‌های خاک با استفاده از دو مجموعه داده حداقل (MDS_1) و مجموعه داده حداقل تصحیح‌شده (MDS_2) و با استفاده از توابع نمره‌دهی خطی (LS) و غیرخطی (NLS) به دو شیوه وزن‌دهی (w_1 و w_2) تعیین شدند. در نتیجه برای هر نمونه خاک، هشت شاخص کیفیت خاک شامل SQI_{w1-LS} ، $SQI_{w1-MDS1-NLS}$ ، $SQI_{w2-MDS1-LS}$ ، $SQI_{w2-MDS1-NLS}$ ، $SQI_{w1-MDS2-LS}$ ، $SQI_{w1-MDS2-NLS}$ ، $SQI_{w2-MDS2-LS}$ و $SQI_{w2-MDS2-NLS}$ به دست آمد (شکل ۱).

$$O(x) = \begin{cases} 0.1 & x < x_1 \\ 0.9 \times \frac{x - x_1}{r_1 - x_1} + 0.1 & x_1 \leq x < r_1 \\ 1 & r_1 \leq x \leq r_2 \\ 1 - 0.9 \times \frac{x - r_2}{x_2 - r_2} & r_2 < x \leq x_2 \\ 0.1 & x > x_2 \end{cases} \quad (3)$$

در این روابط $M(x)$ تابع بیشتر-بهتر، $L(x)$ تابع کمتر-بهتر، $O(x)$ تابع بهینه، x_1 و x_2 به ترتیب حدود آستانه پایینی^۱ و بالایی^۲، r_1 و r_2 به ترتیب مقادیر پایینی^۳ و بالایی^۴ دامنه بهینه و x مقدار ویژگی خاکی مورد نظر است (کی و همکاران، ۲۰۰۹).

تابع نمره‌دهی غیرخطی با استفاده از رابطه ۴ به دست آمد (عسکری و هولدن، ۲۰۱۵).

$$NLS = \frac{1}{1 + (\frac{x}{x_m})^b} \quad (4)$$

NLS تابع نمره‌دهی غیرخطی، x مقدار ویژگی خاک اندازه‌گیری‌شده، x_m میانگین ویژگی موردنظر در کل منطقه، b شیب معادله که برای معادله بیش‌تر- بهتر و کم‌تر- بهتر به ترتیب عدد ۲/۵- و ۲/۵+ استفاده می‌شود.

تابع امتیازدهی "محدوده بهینه" برای ویژگی‌هایی که دارای حدود بهینه مناسبی می‌باشند، مورد استفاده قرار گرفت. به این ترتیب که یک محدوده بهینه برای آن ویژگی خاک تعریف شد و سپس با استفاده از توابع "بیش‌تر- بهتر

۴. Upper value of optimal range

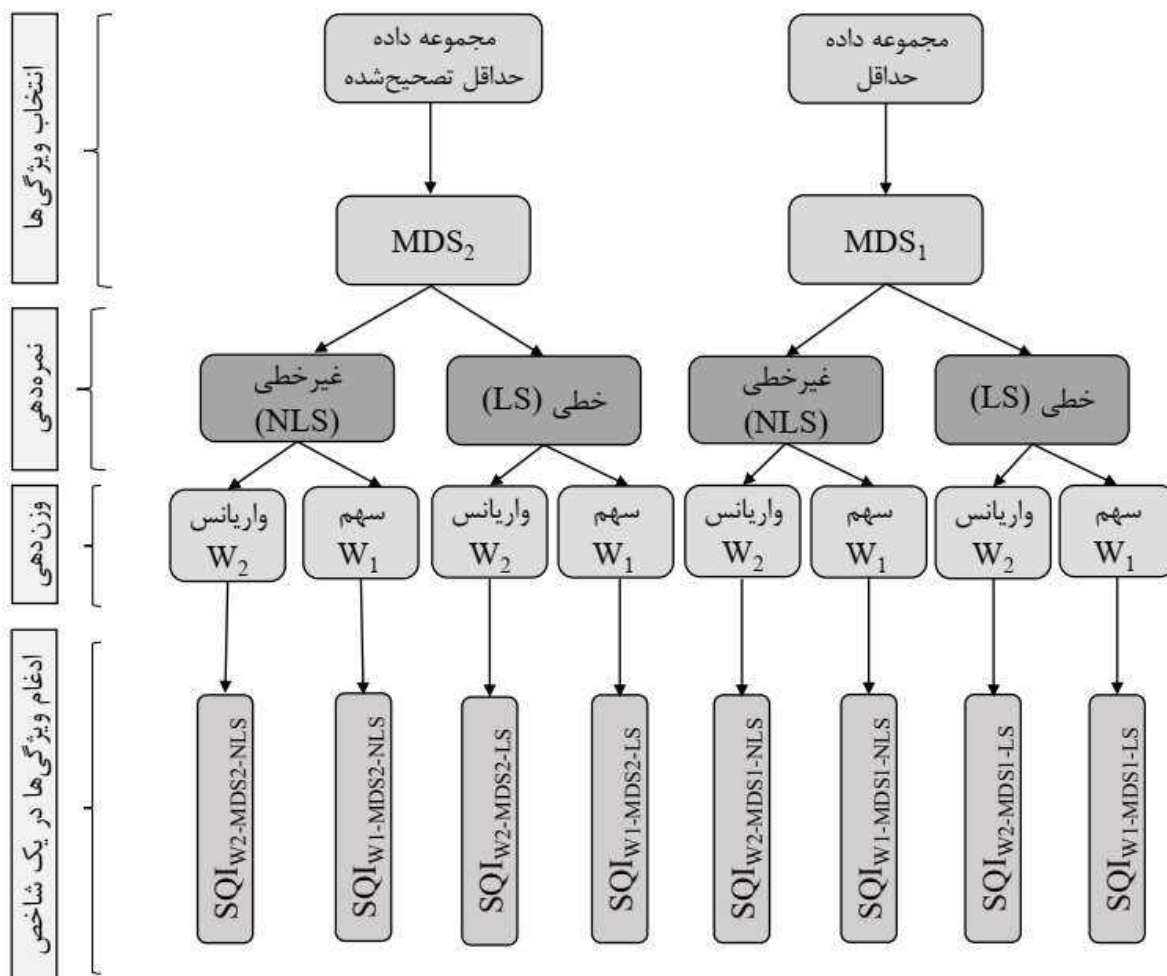
۵. Communalities

۶. Factor analysis

۱. Lower threshold

۲. Upper threshold

۳. Lower value of optimal range



شکل ۱- مراحل انجام محاسبات شاخص کیفیت خاک

شاخص حساسیت و نسبت کارایی

جهت ارزیابی شاخص‌های کیفیت خاک، از شاخص حساسیت و نسبت کارایی استفاده شد (شیدای کرکچ و همکاران، ۲۰۱۹):

$$SI = \frac{SQI_{\max}}{SQI_{\min}} \quad (۶)$$

در رابطه ۶، SI شاخص حساسیت، $SQI_{\max}$ به ترتیب مقادیر حداکثر و حداقل شاخص کیفیت خاک در هر روش محاسباتی است، میزان شاخص حساسیت بالاتر نمایانگر مناسب بودن و حساسیت بیشتر شاخص مدنظر نسبت به تغییرات مدیریتی است.

$$ER = \left(\frac{K}{N}\right) \times 100 \quad (۷)$$

در این رابطه، ER نسبت کارایی، K تعداد همبستگی معنی‌دار بین شاخص کیفیت و ویژگی‌های خاک در هر روش محاسباتی، N تعداد ویژگی‌های خاک است که ۶ ویژگی در MDS_1 و ۵ ویژگی در MDS_2 به عنوان مجموعه داده حداقل انتخاب شدند، بالاتر بودن نسبت کارایی نشان می‌دهد که کدام یک از شاخص‌های محاسباتی کیفیت برای شرایط کلی خاک کارایی بهتری دارد. سرانجام، مقادیر شاخص حساسیت و نسبت کارایی رتبه‌بندی شدند به

نتایج

توصیف آماری ویژگی‌های مورد بررسی در سه کاربری جنگل، مرتع و زراعی در جدول ۱ ارائه شده است، با توجه به میانگین ذرات معدنی خاک، سه کاربری مورد نظر در کلاس بافت رسی قرار گرفتند. با توجه به میانگین ذرات معدنی خاک، اجزای رس، سیلت و شن در سه کاربری مورد نظر به ترتیب ۵۱/۴۹، ۲۸/۲۸ و ۲۰/۲۳ درصد بود که در کلاس بافت رسی قرار گرفتند. میانگین وزنی قطر خاکدانه در کاربری جنگل (۲/۵۵ میلی‌متر) در مقایسه با مرتع (۲/۱۵ میلی‌متر) و زراعی (۱/۷۹ میلی‌متر) بالاتر بود. کاربری زراعی به طور میانگین دارای بالاترین میزان کلسیم کربنات معادل (۱۱/۹۲ درصد) بود. هم‌چنین میانگین کربن آلی در کاربری زراعی (۱/۸۶ درصد) در مقایسه با جنگل و مرتع (۲/۰۴ و ۱/۹۰ درصد) کم‌تر بود. در کاربری جنگل و زراعی بیشترین ضریب تغییرات برای فسفر قابل دسترس و در کاربری مرتع برای قابلیت هدایت الکتریکی به دست آمد. کمترین ضریب تغییرات در هر سه کاربری مربوط به جرم مخصوص ظاهری بود.

طوری‌که بالاترین میزان رتبه یک و مقادیر پایین‌تر دارای رتبه بالاتری بودند و جهت تصمیم‌گیری و اولویت‌دهی^۱ شاخص کیفیت خاک مناسب، مجموع رتبه‌های شاخص حساسیت و نسبت کارایی هر شاخص کیفیت خاک محاسباتی در نظر گرفته شد (شیدای کرکچ و همکاران، ۲۰۱۹). نرمال بودن داده‌ها با آزمون کولموگروف-اسمیرنوف در نرم افزار SPSS نسخه ۲۶ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو فاکتور کاربری (در سه سطح) و عمق خاک (در دو سطح) در نرم افزار SAS نسخه ۹ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد و آنالیز تجزیه به مولفه‌های اصلی و ضریب همبستگی پیرسون در نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام شد. نمودارها توسط EXCEL رسم گردید.

^۱. Priority

جدول ۱- توصیف آماری ویژگی‌های خاک

کاربری جنگل			کاربری مرتع			کاربری زراعی		
ویژگی خاک	میانگین	دامنه تغییرات	انحراف معیار	ضریب تغییرات (%)	میانگین	دامنه تغییرات	انحراف معیار	ضریب تغییرات (%)
رس (%)	۵۱/۲۲	۶۳/۵۶-۴۰/۵۳	۶/۳۷	۱۲/۱۸	۵۲/۷۷	۶۶/۵۰-۴۰/۲۱	۷/۱۰	۱۳/۴۸
سیلت (%)	۲۸/۳۱	۳۴/۶۵-۲۱/۵۸	۳/۴۹	۱۲/۲۷	۲۷/۷۰	۳۵/۹۰-۲۰/۷۰	۴/۱۴	۱۴/۹۸
شن (%)	۲۰/۴۷	۲۵/۹۱-۱۴/۸۶	۲/۹۹	۱۴/۰۶	۱۹/۵۳	۲۵/۳۸-۱۲/۸۰	۳/۲۹	۱۶/۹۷
جرم مخصوص ظاهری (g.cm ⁻³)	۱/۶۳	۱/۶۹-۱/۲۹	۰/۰۹۲	۵/۶۷	۱/۵۶	۱/۶۹-۱/۳۹	۰/۱۰	۶/۷۳
میانگین وزنی قطر خاکدانه (mm)	۲/۵۵	۳/۰۲-۱/۶۲	۰/۴۳	۱۵/۶۶	۲/۱۵	۲/۹۰-۱/۲۳	۰/۴۲	۲۰/۰۵
واکنش خاک	۶/۴۱	۷/۳۶-۵/۳۶	۰/۵۰	۸/۰۱	۷/۰۶	۸/۳۲-۶/۱۶	۰/۶۳	۹/۱۶
قابلیت هدایت الکتریکی (dS.m ⁻¹)	۰/۰۶	۰/۱۱-۰/۰۲	۰/۰۲۳	۳۹/۹۸	۰/۰۷	۰/۱۹-۰/۰۳	۰/۰۴۵	۶۲/۷۰
کربن آلی (%)	۲/۰۴	۲/۸۹-۰/۴۹	۰/۶۶	۱۸/۱۹	۱/۹۰	۲/۹۶-۰/۹۶	۰/۶۲	۲۱/۰۹
کلسیم کربنات معادل (%)	۷/۸۱	۱۴/۷۵-۱/۰۰	۴/۷۳	۶۱/۱۰	۹/۰۵	۱۶/۲۵-۰/۲۵	۵/۱۲	۵۶/۳۲
فسفر قابل دسترس (mg. kg ⁻¹)	۳/۷۵	۱۰/۱۱-۰/۰۲	۳/۳۴	۸۸/۲۴	۴/۷۲	۸/۴۷-۱/۹۴	۲/۱۶	۴۴/۰۲
نیترژن کل (%)	۰/۱۷	۰/۲۸-۰/۰۰	۰/۰۹۷	۵۴/۵۸	۰/۱۷	۰/۳۱-۰/۰۷	۰/۰۷۳	۲۷/۳۶

مجموعه داده حداقل

در MDS₁ با استفاده از آنالیز تجزیه به مولفه‌های اصلی، چهار مولفه اصلی با ارزش ویژه بزرگ‌تر از یک با درصد واریانس تجمعی ۷۱/۶۸ استخراج شد، ویژگی‌های با بیش‌ترین سهم یا بزرگ‌ترین مقادیر بردار ویژه در مولفه اول با درصد واریانس ۲۴/۰۳ شامل درصد رس و سیلت همبستگی معنی‌داری ($r = -0/965$) با یکدیگر داشتند (جدول ۳) و درصد رس با دارا بودن وزن بیش‌تر در مجموعه داده حداقل قرار گرفت. در مولفه دوم با واریانس ۲۱/۲۶ درصد، درصد سیلت دارای بالاترین وزن بود و رس، جرم مخصوص

ظاهری و کربن آلی شامل ۱۰ درصد بالاترین وزن بودند و با توجه به همبستگی پایین بین سیلت با جرم مخصوص ظاهری ($r = -0/427$) و کربن آلی ($r = -0/360$)، (جدول ۳) سه ویژگی سیلت، جرم مخصوص ظاهری و کربن آلی انتخاب شدند، در مولفه سوم (درصد واریانس ۱۵/۹۹) و چهارم (درصد واریانس ۱۰/۴۱) به ترتیب، فسفر قابل دسترس و واکنش خاک با دارا بودن بالاترین وزن به عنوان MDS انتخاب شدند: بنابراین، درصد رس، درصد سیلت، جرم مخصوص ظاهری، کربن آلی، فسفر قابل دسترس و واکنش خاک به عنوان MDS₁ انتخاب شدند (جدول ۲).

جدول ۲- نتایج تجزیه به مولفه‌های اصلی و وزن ویژگی‌های مجموعه داده حداقل بر اساس سهم و واریانس

مجموعه داده حداقل				MDS ₁			
				مولفه ۴	مولفه ۳	مولفه ۲	مولفه ۱
				PC 4	PC 3	PC 2	PC 1
وزن (W ₂)	واریانس	وزن (W ₁)	سهم				
				۱/۰۴۱	۱/۵۹۹	۲/۱۲۶	۲/۴۰۳
				۱۰/۴۱۰	۱۵/۹۸۶	۲۱/۲۵۸	۲۴/۰۲۷
				۷۱/۶۸۱	۶۱/۲۷۱	۴۵/۲۸۵	۲۴/۰۲۷
							بردارهای ویژه
۰/۳۳۵	۰/۲۴۰	۰/۲۰۱	۰/۹۳۸	۰/۰۰۸	۰/۱۷۱	-۰/۶۱۰	-۰/۷۳۲
۰/۰۹۹	۰/۰۷۱	۰/۱۹۹	۰/۹۳۰	-۰/۰۱۳	-۰/۲۱۸	۰/۶۲۶	۰/۷۰۰
۰/۰۹۹	۰/۰۷۱	۰/۱۱۸	۰/۵۵۰	-۰/۱۱۳	-۰/۳۹۷	۰/۶۰۹	-۰/۰۸۸
				۰/۴۲۸	-۰/۰۰۹	۰/۴۱۶	-۰/۴۸۰
۰/۱۴۵	۰/۱۰۴	۰/۱۷۵	۰/۸۱۵	۰/۶۱۰	۰/۰۸۴	-۰/۲۷۰	۰/۶۰۲
				۰/۲۸۹	۰/۳۳۹	-۰/۳۳۹	۰/۶۳۵
۰/۰۹۹	۰/۰۷۱	۰/۱۵۱	۰/۷۰۲	-۰/۰۴۴	۰/۵۸۳	۰/۵۹۲	-۰/۱۰۰
				-۰/۴۵۷	-۰/۱۱۶	-۰/۲۷۷	۰/۵۶۶
۰/۲۲۳	۰/۱۶۰	۰/۱۵۶	۰/۷۲۶	-۰/۴۰۶	۰/۷۲۳	-۰/۰۳۳	۰/۱۹۳
				۰/۱۱۸	۰/۶۰۴	۰/۴۴۹	-۰/۰۷۱

اعداد پررنگ به‌عنوان بیش‌ترین وزن در نظر گرفته شدند. اعداد پررنگ که زیر آنها خط کشیده شده است، به‌عنوان MDS انتخاب شدند.

جدول ۳- همبستگی پیرسون ویژگی‌های خاک برای مولفه‌های با بیش‌ترین وزن

کلسیم کربنات معادل	کربن آلی	واکنش خاک	جرم مخصوص ظاهری خاک	سیلت	رس
				۱	رس
				۱	سیلت
			۱	۰/۴۳۷**	۰/۴۶۳**
		۱	۰/۱۰۲	۰/۱۸۶	۰/۲۲۸
	۱	۰/۲۰۲	۰/۸۹۲**	۰/۳۶۰*	۰/۱۸۰
۱	۰/۱۸۶	۰/۱۵۵	۰/۱۶۳	۰/۱۷۸	۰/۱۹۳
					کلسیم کربنات معادل

* و ** به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد می‌باشد.

وزن و کلسیم کربنات معادل شامل ۱۰ درصد بالاترین وزن بود و با توجه به همبستگی پایین بین آنها ($r = 0/155$)، (جدول ۳) هر دو ویژگی به عنوان مجموعه داده حداقل انتخاب شدند و در مولفه دوم فاسفر قابل دسترس به عنوان MDS انتخاب شد. به این ترتیب در روش دوم سیلت، میانگین وزنی قطر خاکدانه، واکنش خاک، کلسیم کربنات معادل و فاسفر قابل دسترس به عنوان MDS₂ انتخاب شدند (جدول ۴). جهت دستیابی به وزن ویژگی‌های خاک در هر دو روش انتخاب مجموعه داده حداقل به دو صورت سهم هر ویژگی حاصل از آنالیز تجزیه به مولفه‌های اصلی و دیگری درصد واریانس استاندارد انجام شد (جدول ۲ و ۴).

در MDS₂ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک به طور مجزا مورد آنالیز تجزیه به مولفه‌های اصلی قرار گرفتند، به طوری که ویژگی‌های فیزیکی خاک به دو مولفه اصلی با ارزش ویژه بزرگ‌تر از یک، مولفه اول و دوم به ترتیب با واریانس ۵۲/۳۸ و ۳۰/۳۱ درصد و در مجموع ۸۲/۶۹ درصد واریانس تجزیه شدند. در مولفه اول، سیلت و رس ویژگی‌های دارای بالاترین وزن بودند که به دلیل همبستگی بالا ($r = -0/965$)، (جدول ۳) سیلت به عنوان MDS انتخاب شد. در مولفه دوم، میانگین وزنی قطر خاکدانه دارای بالاترین وزن بود. در آنالیز تجزیه به مولفه‌های اصلی ویژگی‌های شیمیایی خاک دو مولفه با درصد واریانس ۳۱/۰۸، ۲۶/۸۲ و با واریانس تجمعی ۵۷/۹۰ درصد حاصل شد. در مولفه اول، واکنش خاک دارای بالاترین

جدول ۴- نتایج تجزیه به مولفه‌های اصلی و وزن ویژگی‌های مجموعه داده حداقل تصحیح‌شده بر اساس سهم و واریانس

مجموعه داده حداقل تصحیح شده				شیمیایی		فیزیکی			
MDS ₂									
وزن (W ₂)	واریانس	وزن (W ₁)	سهم	مولفه ۲ PC 2	مولفه ۱ PC 1	مولفه ۲ PC 2	مولفه ۱ PC 1		
				۱/۶۰۹	۱/۸۶۵	۱/۲۱۳	۲/۰۹۵	ارزش ویژه	
				۲۶/۸۲۰	۳۱/۰۸۰	۳۰/۳۱۴	۵۲/۳۸۰	درصد واریانس	
				۵۷/۹۰۰	۳۱/۰۸۰	۸۲/۶۹۴	۵۲/۳۸۰	درصد واریانس تجمعی	
								بردارهای ویژه	ویژگی های فیزیکی
						۰/۱۲۹	-۰/۹۷۰	رس	
۰/۳۰۶	۰/۵۲۴	۰/۳۰۱	۰/۹۵۸			-۰/۱۱۰	۰/۹۷۳	سیلت	
						۰/۶۶۷	۰/۴۵۰	جرم مخصوص ظاهری	
								خاک	
۰/۱۷۶	۰/۳۰۲	۰/۲۳۴	۰/۷۴۵			۰/۸۶۰	-۰/۰۷۹	میانگین وزنی قطر خاکدانه	
									ویژگی های شیمیایی
				۰/۲۸۱	۰/۶۹۲			واکنش خاک	
				۰/۵۱۹	۰/۶۲۱			قابلیت هدایت الکتریکی	
				۰/۵۸۵	-۰/۵۵۸			کربن آلی	
۰/۱۸۱	۰/۳۱۱	۰/۱۲۹	۰/۴۱۱	۰/۱۰۳	۰/۶۳۳			کلسیم کربنات معادل	
۰/۱۵۶	۰/۲۶۸	۰/۱۶۱	۰/۵۱۰	۰/۷۱۴	-۰/۰۰۸			فسفر قابل دسترس	
				۰/۶۳۱	-۰/۴۵۰			نیتروژن کل	

اعداد پررنگ به‌عنوان بیش‌ترین وزن در نظر گرفته شدند. اعداد پررنگ که زیر آنها خط کشیده شده است، به‌عنوان MDS انتخاب شدند.

شاخص کیفیت خاک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد (به دلیل محدودیت حجم مقاله، جدول ارائه نشده است) که در MDS₁، اثر عمق خاک بر SQI_{w1}-MDS1-LS و SQI_{w1}-MDS1-NLS در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود و عمق ۰ تا ۱۰ سانتی‌متر در مقایسه با عمق ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر از میانگین شاخص کیفیت خاک بالاتری برخوردار بود (جدول ۵). اثر عمق خاک در سطح احتمال ۱ درصد و اثر متقابل کاربری و عمق بر SQI_{w2}-MDS1-LS و SQI_{w2}-MDS1-NLS به ترتیب در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد معنی‌دار بود به طوری که کاربری زراعی در عمق ۰ تا ۱۰ سانتی‌متر و ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر به ترتیب از بیش‌ترین و

کم‌ترین شاخص کیفیت خاک برخوردار بود (جدول ۵). در MDS₂ اثر کاربری اراضی و اثر عمق خاک بر SQI_{w1}-MDS2-LS و SQI_{w2}-MDS2-LS معنی‌دار نبود. با این حال کاربری جنگل در مقایسه با مرتع و زراعی از میانگین شاخص کیفیت خاک بالاتری برخوردار بود و میزان آن با افزایش عمق کاهش یافت. اثر کاربری اراضی بر SQI_{w1}-MDS2-NLS و SQI_{w2}-MDS2-NLS در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود و خاک کاربری جنگل و مرتع در مقایسه با زراعی از میانگین شاخص کیفیت بالاتری برخوردار بود (جدول ۵). در MDS₂، تفاوت بین کاربری‌های اراضی از نظر شاخص کیفیت خاک در روش نمره‌دهی غیرخطی در مقایسه با روش نمره‌دهی خطی بهتر مشاهده شد.

جدول ۵- مقایسه میانگین شاخص‌های کیفیت خاک در کاربری و عمق‌های مختلف

شاخص کیفیت خاک		کاربری جنگل		کاربری مرتع		کاربری زراعی	
		۱۰-۲۰cm	۰-۱۰cm	۱۰-۲۰cm	۰-۱۰cm	۱۰-۲۰cm	۰-۱۰cm
MDS ₁	LS	SQI _{W1} -MDS1-LS	۰/۶۰ ^{Aa}	۰/۴۸ ^{Ab}	۰/۵۶ ^{Aa}	۰/۵۴ ^{Ab}	۰/۶۳ ^{Aa}
		SQI _{W2} -MDS1-LS	۰/۶۲ ^{ab}	۰/۵۵ ^c	۰/۵۷ ^{bc}	۰/۵۶ ^{bc}	۰/۶۸ ^a
	NLS	SQI _{W1} -MDS1-NLS	۰/۵۱ ^{Aa}	۰/۴۴ ^{Ab}	۰/۵۰ ^{Aa}	۰/۴۸ ^{Ab}	۰/۵۳ ^{Aa}
		SQI _{W2} -MDS1-NLS	۰/۴۹ ^{ab}	۰/۴۳ ^b	۰/۵۱ ^a	۰/۴۸ ^{ab}	۰/۵۴ ^a
MDS ₂	LS	SQI _{W1} -MDS2-LS	۰/۶۵ ^{Aa}	۰/۶۱ ^{Aa}	۰/۶۴ ^{Aa}	۰/۶۳ ^{Aa}	۰/۶۳ ^{Aa}
		SQI _{W2} -MDS2-LS	۰/۶۵ ^{Aa}	۰/۶۱ ^{Aa}	۰/۶۳ ^{Aa}	۰/۶۲ ^{Aa}	۰/۶۳ ^{Aa}
	NLS	SQI _{W1} -MDS2-NLS	۰/۵۳ ^{Aa}	۰/۵۰ ^{Aa}	۰/۵۲ ^{Aa}	۰/۴۹ ^{Aa}	۰/۴۹ ^{Ba}
		SQI _{W2} -MDS2-NLS	۰/۵۳ ^{Aa}	۰/۵۱ ^{Aa}	۰/۵۲ ^{Aa}	۰/۵۰ ^{Aa}	۰/۵۰ ^{Ba}

MDS₁ مجموعه داده حداقل، MDS₂ مجموعه داده حداقل تصحیح‌شده، LS تابع نمره‌دهی خطی، NLS تابع نمره‌دهی غیرخطی، W₁ روش وزن‌دهی سهم و W₂ روش وزن‌دهی واریانس (حروف بزرگ مشابه بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بین کاربری‌های مختلف در هر عمق خاک می‌باشد. حروف کوچک مشابه بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بین اعماق مختلف در هر کاربری می‌باشد).

دامنه تغییرات و شاخص حساسیت برای شاخص‌های مختلف کیفیت خاک در (جدول ۶) بیان شد. در مطالعه حاضر، اغلب شاخص‌های کیفیت خاک در MDS₂ در مقایسه با MDS₁ و همچنین روش نمره‌دهی غیرخطی در مقایسه با روش نمره‌دهی خطی از شاخص حساسیت بالاتری برخوردار بودند. شاخص حساسیت SQI_{W1}-MDS2-NLS و SQI_{W2}-MDS2-NLS به ترتیب ۲/۳۵ و ۳/۱۴ بود (جدول ۶).

جدول ۶- توصیف آماری و شاخص حساسیت برای شاخص‌های کیفیت خاک

MDS ₂				MDS ₁				
SQI _{W2} -MDS2-NLS	SQI _{W1} -MDS2-NLS	SQI _{W2} -MDS2-LS	SQI _{W1} -MDS2-LS	SQI _{W2} -MDS1-NLS	SQI _{W1} -MDS1-NLS	SQI _{W2} -MDS1-LS	SQI _{W1} -MDS1-LS	
۰/۲۸	۰/۳۴	۰/۴۳	۰/۴۲	۰/۳۲	۰/۳۳	۰/۳۴	۰/۳۳	حداقل
۰/۸۸	۰/۸۰	۰/۸۰	۰/۸۰	۰/۶۸	۰/۶۳	۰/۶۲	۰/۶۹	حداکثر
۰/۵۸	۰/۵۵	۰/۶۳	۰/۶۲	۰/۴۹	۰/۴۸	۰/۴۹	۰/۵۰	میانگین
۳/۱۴	۲/۳۵	۱/۸۶	۱/۹۰	۲/۱۳	۱/۹۱	۱/۸۲	۲/۰۹	شاخص حساسیت
۱	۲	۷	۶	۳	۵	۸	۴	رتبه‌بندی

همبستگی معنی‌داری با شاخص کیفیت خاک مورد نظر بودند بر مجموع تعداد کل ویژگی‌های MDS تقسیم شد. در این مطالعه، MDS₂ که شامل ویژگی‌هایی چون سیلت، میانگین وزنی قطر خاکدانه، واکنش خاک، کلسیم کربنات معادل و فسفر قابل دسترس است در مقایسه با MDS₁ با دارا بودن راندمان ۸۰ درصد از کارایی بالاتری برخوردار بود (جدول ۷).

MDS₁ مجموعه داده حداقل، MDS₂ مجموعه داده حداقل تصحیح‌شده، LS تابع نمره‌دهی خطی، NLS تابع نمره‌دهی غیرخطی، W₁ روش وزن‌دهی سهم و W₂ روش وزن‌دهی واریانس جهت دستیابی به نتایج نسبت کارایی، همبستگی بین شاخص کیفیت خاک با ویژگی‌های مورد نظر در MDS₁ (۶ ویژگی) و MDS₂ ۵ ویژگی در نظر گرفته شد؛ برای هر یک از شاخص‌های کیفیت خاک، تعداد ویژگی‌هایی که دارای

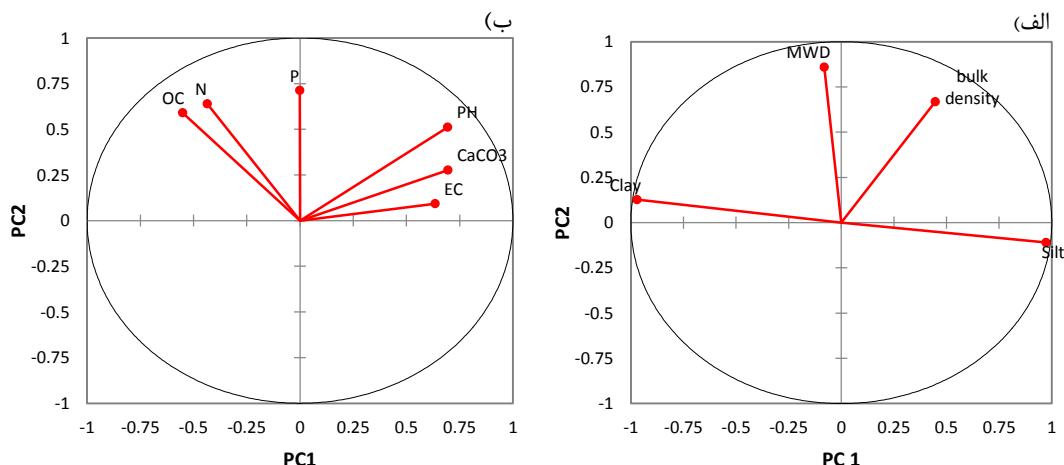
جدول ۷- نسبت کارایی و همبستگی پیرسون شاخص‌های کیفیت خاک و ویژگی‌های اندازه‌گیری شده

MDS ₂				MDS ₁				
SQI _{W2-MDS2-NLS}	SQI _{W1-MDS2-NLS}	SQI _{W2-MDS2-LS}	SQI _{W1-MDS2-LS}	SQI _{W2-MDS1-NLS}	SQI _{W1-MDS1-NLS}	SQI _{W2-MDS1-LS}	SQI _{W1-MDS1-LS}	
-	-	-	-	۰/۰۵۲	۰/۳۲۵*	۰/۰۵۹	۰/۲۲۵	رس
۰/۴۵۵**	-۰/۴۵۸**	-۰/۶۵۹**	-۰/۶۴۵**	-۰/۰۷۹	-۰/۳۶۲**	-۰/۰۶۸	-۰/۲۳۱	سیلت
-	-	-	-	-۰/۲۷۰*	-۰/۱۹۵	-۰/۱۶۱	-۰/۱۸۶	جرم مخصوص ظاهری خاک
۰/۴۲۱**	۰/۵۰۹**	۰/۴۰۰**	۰/۴۳۹**	-	-	-	-	میانگین وزنی قطر خاکدانه
-۰/۱۵۷	-۰/۱۶۳	-۰/۲۲۸	-۰/۲۱۱	۰/۲۱۳	-۰/۱۵۵	-۰/۱۴۶	-۰/۱۹۶	واکنش خاک
-	-	-	-	۰/۱۴۱	۰/۵۸۸**	۰/۶۳۷**	۰/۶۶۸**	کربن آلی
-۰/۶۷۴**	-۰/۵۶۷**	-۰/۴۹۸**	-۰/۴۳۶**	-	-	-	-	کلسیم کربنات معادل
۰/۴۳۹**	۰/۴۹۵**	۰/۳۳۱**	۰/۳۴۵**	۰/۳۳۳**	۰/۷۹۵**	۰/۶۸۸**	۰/۶۰۰**	فسفر قابل دسترس
۸۰	۸۰	۸۰	۸۰	۳۳	۶۶	۳۳	۳۳	نسبت کارایی
۱	۱	۱	۱	۳	۲	۳	۳	رتبه‌بندی

* و ** به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد می‌باشد.

اساس، در توزیع وزن ویژگی‌های فیزیکی در مولفه اول (محور افقی) سیلت و در مولفه دوم (محور عمودی) میانگین وزنی قطر خاکدانه و در ویژگی‌های شیمیایی، واکنش خاک و کلسیم کربنات معادل (مولفه اول) و فسفر قابل دسترس (مولفه دوم) بیش‌ترین فاصله از محور مختصات و از بیش‌ترین وزن برخوردار بودند و به عنوان MDS انتخاب شدند.

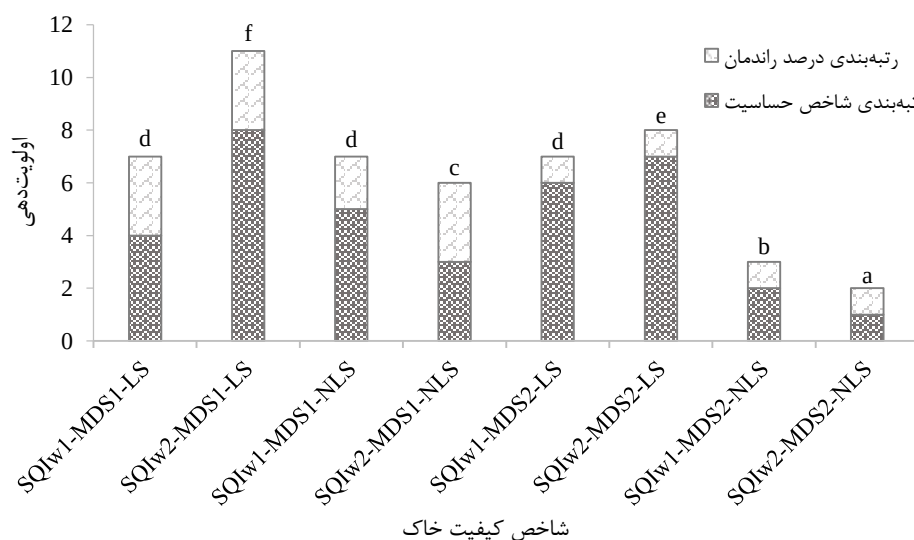
با توجه به برتری MDS₂ در مقایسه با MDS₁ رابطه بین ویژگی‌های خاک و مولفه‌ها در (شکل ۲) نشان داده شده است، در نتایج آنالیز تجزیه به مولفه‌های اصلی MDS₂ (جدول ۴) هر یک از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی دارای دو مولفه بودند. در هر مولفه، ویژگی‌هایی با وزن بیش‌تر، در فاصله دورتری از مرکز محور مختصات (نقطه صفر) قرار گرفتند و به عنوان ویژگی‌های مهم محسوب شدند. بر این



شکل ۲- توزیع وزن ویژگی‌های خاک در مولفه‌ها. الف) توزیع وزن ویژگی‌های فیزیکی، ب) توزیع وزن ویژگی‌های شیمیایی

گرفت. همچنین از نظر نسبت کارایی، شاخص‌های کیفیت خاک در MDS₂ همگی دارای رتبه یک بودند. به این ترتیب براساس اولویت‌دهی شاخص‌های کیفیت خاک، SQI_{W2}-MDS₂-NLS اولین رتبه و SQI_{W2}-MDS₁-LS پایین‌ترین رتبه را داشت (شکل ۳).

رتبه‌بندی مقادیر دو معیار شاخص حساسیت و نسبت کارایی به ترتیب در جداول ۶ و ۷ نشان داده شد. از نظر شاخص حساسیت، SQI_{W2}-MDS₂-NLS دارای رتبه ۱ و SQI_{W1}-MDS₂-NLS دارای رتبه ۲ بوده و SQI_{W2}-MDS₁-LS با پایین‌ترین میزان شاخص حساسیت (۱/۸۲) در رتبه ۸ قرار



شکل ۳- اولویت‌دهی شاخص‌های مختلف کیفیت خاک. (a) اولین، b دومین، c سومین، d چهارمین، e پنجمین، f ششمین)

MDS₁ مجموعه داده حداقل، MDS₂ مجموعه داده حداقل تصحیح‌شده، LS تابع نمره‌دهی خطی، NLS تابع نمره‌دهی غیرخطی، W₁ روش وزن‌دهی سهم و W₂ روش وزن‌دهی واریانس

بحث

بر اساس طبقه‌بندی والینگ و وب (۱۹۸۰) ویژگی‌های با ضریب تغییرات کم‌تر از ۱۵ درصد، ۱۵ تا ۳۵ درصد و بیش‌تر از ۳۵ درصد به ترتیب نشان‌دهنده تغییرپذیری پایین، متوسط و بالا است. با توجه به نتایج جدول ۱ فسفر قابل دسترس، قابلیت هدایت الکتریکی، نیتروژن کل و کلسیم کربنات معادل در مقایسه با سایر ویژگی‌ها از بالاترین تغییرپذیری برخوردار بودند که بالاتر بودن میزان ویژگی‌های مورد نظر در مطالعات رضایی و همکاران (۲۰۲۰) و زراعت‌پیشه و همکاران (۲۰۲۰) مشاهده شد. به نظر می‌رسد تغییرپذیری بالای ویژگی‌های مورد نظر به دلیل شیوه‌های مدیریتی خاک و شرایط منطقه مطالعاتی باشد.

انتخاب MWD و کلسیم کربنات معادل به عنوان ویژگی‌های مجموعه داده حداقل تصحیح‌شده در MDS_2 و استفاده از توابع نمره‌دهی بیش‌تر-بهرتر و کم‌تر-بهرتر (نبی‌اللهی و همکاران، ۲۰۱۷) به ترتیب برای میانگین وزنی قطر خاکدانه و کلسیم کربنات معادل می‌تواند مقادیر بالاتر کیفیت خاک در کاربری جنگل در مقایسه با مرتع و زراعی را توجیه کند، زیرا میانگین وزنی قطر خاکدانه در کاربری جنگل بالاتر از زراعی بود و کاربری زراعی دارای میزان کلسیم کربنات معادل بالاتری بود که دلیل آن می‌تواند عمق کم خاک (کم‌تر از ۰/۵ متر) و مواد مادری آهکی در منطقه مورد مطالعه باشد (جدول ۱). خاک‌های جنگلی و زراعی به ترتیب دارای بیش‌ترین و کم‌ترین میانگین وزنی قطر خاکدانه در هر دو عمق مورد بررسی بودند. ماده آلی خاک نقش مهمی در تشکیل و پایداری خاکدانه‌ها دارد (لیو و همکاران، ۲۰۱۹؛ لیو و همکاران، ۲۰۱۷). از پیامدهای خاکورزی و عملیات زراعی می‌توان به شکسته شدن خاکدانه‌ها و افزایش سرعت تجزیه ماده آلی خاک اشاره کرد (دوو و همکاران، ۲۰۲۰؛ توبا و همکاران، ۲۰۱۹). کاربری جنگل کم‌ترین مقدار کلسیم کربنات معادل در هر دو عمق سطحی و زیرسطحی را دارا بود و نسبت به کاربری زراعی اختلاف معنی‌داری نشان داد؛ که مقادیر کم‌تر

کلسیم کربنات معادل در خاک‌های جنگلی می‌تواند به علت آبشویی و انتقال کربنات‌ها به لایه‌های پایین‌تر خاک باشد (ایوبی و موذنی دهقانی، ۲۰۲۰؛ داوری و همکاران، ۲۰۲۰). هم‌چنین بالاتر بودن میزان کیفیت خاک در عمق ۰ تا ۱۰ سانتی‌متر در مقایسه با عمق ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر می‌تواند به دلیل کاهش کربن آلی خاک و در نتیجه پایداری خاکدانه با افزایش عمق خاک باشد. با افزایش عمق خاک میزان ماده آلی خاک کاهش معنی‌داری در هر سه کاربری نشان داد، وجود بقایای گیاهی و ریشه‌های گسترده در لایه سطحی در کاربری جنگل و مرتع افزایش ماده آلی خاک را به دنبال دارد که این امر می‌تواند موجب بهبود خاکدانه‌سازی نیز شود (ظاهر و همکاران، ۲۰۲۰؛ ژائو و همکاران، ۲۰۱۹).

کاربری جنگل کم‌ترین مقدار کلسیم کربنات معادل در هر دو عمق سطحی و زیرسطحی را دارا بود و نسبت به کاربری زراعی اختلاف معنی‌داری نشان داد؛ که می‌تواند به علت آبشویی و انتقال کربنات‌ها به لایه‌های پایین‌تر خاک باشد (ایوبی و موذنی دهقانی، ۲۰۲۰؛ داوری و همکاران، ۲۰۲۰).

تغییرات نامناسب کاربری اراضی می‌تواند باعث کاهش کیفیت خاک شود (دوان و همکاران، ۲۰۲۱) که چالش بزرگی برای افزایش تولید محصول، رشد اقتصادی و محیط زیست به شمار می‌آید (تسفه‌ونگن، ۲۰۱۴). با توجه به اقلیم مرطوب در منطقه مورد بررسی، ورود سالانه بقایای گیاهی تازه به خاک زیاد بوده و منجر به تجمع زیاد کربن در ذرات درشت خاک می‌شود. با توجه به حساسیت زیاد این بخش از کربن به تغییر کاربری اراضی، جنگل‌تراشی باعث کاهش توانایی ذخیره کربن و هم‌چنین افت شاخص کیفیت خاک می‌شود (تقی‌پور و همکاران، ۱۳۹۸). بالاتر بودن میزان کیفیت خاک در کاربری جنگل و مرتع در مقایسه با کاربری زراعی با نتایج سایر مطالعات مطابقت دارد به طوری‌که چنند و همکاران (۲۰۱۸) در ارزیابی کیفیت خاک در پنج کاربری اراضی در هند به این نتیجه رسیدند که کاربری جنگل در

مقایسه با سایر کاربری‌ها از میزان کربن آلی بالاتری برخوردار بود و ویژگی‌هایی مانند کربن آلی، رس و عامل فرسایش‌پذیری خاک به عنوان مجموعه داده حداقل انتخاب شدند، کاربری جنگل و اراضی بدون پوشش به ترتیب دارای بالاترین و کم‌ترین شاخص کیفیت خاک بودند. هوانگ و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی اثرات جنگل‌زدایی و کشت ذرت بر کیفیت خاک در دو کاربری جنگل و اراضی زراعی و در عمق ۰ تا ۱۴۰ سانتی‌متر در مناطق گرمسیری چین پرداختند. با توجه به نتایج دریافتند که کاربری جنگل در مقایسه با اراضی زراعی از شاخص کیفیت خاک بالاتری برخوردار بود و با افزایش عمق میزان آن کاهش داشت. در پژوهشی در مازندران دریافتند که از ۸ ویژگی مورد بررسی، کربن آلی، pH، کلسیم کربنات معادل، ظرفیت تبادل کاتیونی و قابلیت هدایت الکتریکی به عنوان مجموعه داده حداقل انتخاب شدند. مقادیر شاخص کیفیت خاک به روش نمره‌دهی خطی در مقایسه با نمره‌دهی غیرخطی از معنی‌داری بالاتری برخوردار بود و شاخص کیفیت نمورو در مقایسه با شاخص تجمعی و ساده کیفیت خاک دارای برآورد بهتری بود. کاربری جنگل و زراعی دیم‌زار به ترتیب از بالاترین و کم‌ترین مقادیر شاخص کیفیت خاک در دو روش نمره‌دهی برخوردار بودند (زراعت‌پیشه و همکاران، ۲۰۲۰). در مطالعه‌ای ژانگ و همکاران (۲۰۲۱) به ارزیابی کیفیت خاک در جنگل دست‌کاشت، بوته‌زار، مرتع و کشاورزی با استفاده از روش نمره‌دهی غیر خطی در مناطق نیمه گرمسیری چین پرداختند. کاربری جنگل در مقایسه با سایر کاربری‌ها دارای میزان کربن آلی خاک، نیتروژن کل و فسفر قابل دسترس بالاتر و میزان رس پایین‌تر بود. ویژگی‌های خاک شامل کربن آلی خاک، سیلت، فسفر و پتاسیم قابل دسترس، ضخامت خاک، میزان رطوبت خاک به عنوان مجموعه داده حداقل انتخاب شدند. جنگل و اراضی کشاورزی به ترتیب از بالاترین و کم‌ترین مقدار شاخص کیفیت خاک در مجموعه داده کل و مجموعه داده حداقل برخوردار بودند.

روش‌های غیرخطی نیاز به اطلاعات کامل‌تری در مورد سیستم‌های خاک و گیاه در منطقه مورد مطالعه نسبت به روش‌های خطی دارند. هم‌چنین محاسبات ریاضی روش‌های نمره‌دهی غیرخطی از پیچیدگی بیش‌تری در مقایسه با روش‌های خطی برخوردار است. این تفاوت‌ها در روش‌های نمره‌دهی به پیچیدگی و شرایط به خصوص خاک‌ها و کاربری اراضی در منطقه مطالعاتی ارتباط دارد (یو و همکاران، ۲۰۱۸a). نتایج سایر مطالعات، مطابق پژوهش حاضر برتری روش نمره‌دهی غیرخطی در مقایسه با روش خطی را نشان داده است (نبی‌اللهی و همکاران، ۲۰۱۸a؛ یو و همکاران، ۲۰۱۸a؛ یو و همکاران، ۲۰۱۸b). محققین معتقدند که استفاده از روش‌های غیرخطی برای تعیین کیفیت خاک اگرچه دشوار است اما می‌تواند کارکردهای سیستم را بهتر از روش خطی نشان دهد (عسکری و هولدن، ۲۰۱۴؛ رئیسی و کبیری، ۲۰۱۶).

به طور معمول مجموع کل ویژگی‌های خاک، مورد آنالیز تجزیه به مولفه‌های اصلی قرار می‌گیرد. این امر ممکن است سبب شود که برخی از ویژگی‌های تاثیرگذار فیزیکی یا شیمیایی خاک به عنوان مجموعه داده حداقل انتخاب نشده و حساسیت شاخص کیفیت خاک نسبت به تغییرات کیفیت خاک کاهش یافته و نتایج حاصل از صحت قابل قبولی برخوردار نباشند (زوبر و همکاران، ۲۰۱۷). در این مطالعه، از دو روش شامل مجموعه داده حداقل (MDS₁) و مجموعه داده حداقل تصحیح‌شده (MDS₂) استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که MDS₂ در مقایسه با MDS₁ از نتایج بهتری برخوردار است و کاربری جنگل (کاربری شاهد) در مقایسه با دو کاربری مرتع و زراعی دارای مقادیر شاخص کیفیت خاک بالاتری بود. در مطالعات گوناگون، شاخص کیفیت خاک مناسب با توجه به اثر معنی‌داری بالاتر انتخاب شده است (یو و همکاران، ۲۰۱۸b؛ زراعت‌پیشه و همکاران، ۲۰۲۰). حمیدی نهرانی و همکاران (۱۳۹۹) به منظور تعیین مناسب‌ترین ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک با آنالیز تجزیه

نسبت کارایی معیاری است که در بررسی کارایی شاخص کیفیت خاک در توصیف وضعیت کلی خاک کاربرد دارد (شیدای کرکج و همکاران، ۲۰۱۹). در مطالعات گوناگون جهت ارزیابی شاخص کیفیت از نسبت کارایی استفاده شده است (شیدای کرکج و همکاران، ۲۰۱۹؛ ژو و همکاران، ۲۰۲۲). در این پژوهش، MDS_2 که شامل ویژگی‌هایی چون سیلت، میانگین وزنی قطر خاکدانه، واکنش خاک، کلسیم کربنات معادل و فسفر قابل دسترس است در مقایسه با MDS_1 با دارا بودن میزان نسبت کارایی ۸۰ درصد از کارایی بالاتری برخوردار بود و می‌توان اظهار داشت که وضعیت کیفیت خاک را به خوبی می‌تواند توصیف نماید (جدول ۷). با فرض اینکه دو معیار شاخص حساسیت و نسبت کارایی سهم و تاثیر یکسانی در انتخاب شاخص کیفیت خاک مناسب و کارآمد دارند (شیدای کرکج و همکاران، ۲۰۱۹)، رتبه‌های دو معیار مورد نظر برای هر شاخص کیفیت خاک تجمع شدند. بدین ترتیب براساس اولویت‌دهی، شاخص کیفیت خاک با رتبه ۱، برای ارزیابی کیفیت خاک منطقه مورد مطالعه مناسب‌تر است که $SQI_{W2-MDS2-NLS}$ و $SQI_{W2-MDS1-LS}$ به ترتیب از بالاترین و پایین‌ترین رتبه برخوردار بودند (شکل ۳).

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر اثر جنگل‌تراشی بر کیفیت خاک با استفاده از تحلیل‌های چند متغیره در منطقه سی‌دشت استان گیلان بررسی شد. در MDS_2 که ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی به طور مجزا مورد تجزیه به مولفه‌های اصلی قرار گرفتند؛ سیلت، میانگین وزنی قطر خاکدانه، واکنش خاک، کلسیم کربنات معادل و فسفر قابل دسترس به عنوان ویژگی‌های مجموعه داده حداقل تصحیح‌شده تعیین شدند. نتایج نشان داد که MDS_2 در روش نمره‌دهی غیرخطی تفاوت بین کاربری‌های اراضی از نظر شاخص کیفیت خاک را نشان

به مولفه‌های اصلی به بررسی ویژگی‌های خاک به طور جداگانه و مجموع کل ویژگی‌های خاک به روش نمره‌دهی خطی و غیرخطی در دو کاربری کشاورزی آبی و دیم پرداختند و نشان دادند که هر دو روش محاسباتی کارایی لازم برای ارزیابی کیفیت خاک را داشتند و روش نمره‌دهی خطی در مقایسه با غیرخطی از معنی‌داری بالاتری برخوردار بود. نتایج پژوهش دیگری نشان داد که آنالیز تجزیه به مولفه‌های اصلی ویژگی‌های خاک به طور مجزا و روش نمره‌دهی غیرخطی جهت ارزیابی کیفیت خاک از کارایی بهتری برخوردار است (یو و همکاران، ۲۰۱۸a) که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد.

تعیین شاخص حساسیت یکی از روش‌هایی است که در مطالعات گوناگون به مقایسه شاخص‌های مختلف کیفیت خاک پرداخته و بر این اساس شاخص کیفیت خاک با کارایی بهتر انتخاب می‌گردد (مامه پور و همکاران، ۲۰۲۱؛ رضایی و همکاران، ۲۰۲۰؛ سلمی و همکاران، ۲۰۲۱؛ شیدای کرکج و همکاران، ۲۰۱۹؛ ژو و همکاران، ۲۰۲۲). در مطالعه حاضر، اغلب شاخص‌های کیفیت خاک بر اساس MDS_2 در مقایسه با MDS_1 و همچنین در روش نمره‌دهی غیرخطی در مقایسه با روش خطی از شاخص حساسیت بالاتری برخوردار بودند که بیانگر حساسیت بیشتر و مناسب بودن آن‌ها در محاسبه شاخص کیفیت خاک است (مامه پور و همکاران، ۲۰۲۱؛ نبی‌اللهی و همکاران، ۲۰۱۸a). بیش‌ترین شاخص حساسیت برای $SQI_{W1-MDS2-NLS}$ و $SQI_{W2-MDS2-NLS}$ به ترتیب ۲/۳۵ و ۳/۱۴ به دست آمد (جدول ۶). به این ترتیب شاخص کیفیت خاک با روش وزن‌دهی واریانس و نمره‌دهی غیرخطی در MDS_2 ($SQI_{W2-MDS2-NLS}$) دارای بالاترین میزان شاخص حساسیت (۳/۱۴) بود که در مقایسه با سایر روش‌های محاسباتی، تغییر در شیوه‌های مدیریتی را به خوبی نشان می‌دهد و با نتایج سایر مطالعات (چن و همکاران، ۲۰۱۳؛ سلمی و همکاران، ۲۰۲۱؛ ژو و همکاران، ۲۰۲۲) مطابقت دارد.

درصد در مقایسه با MDS₁ از کارایی بالاتری برخوردار بود. بر اساس اولویت‌دهی نهایی و با در نظر گرفتن مجموع رتبه‌های شاخص حساسیت و نسبت کارایی مشخص می‌شود که SQIW₂-MDS₂-NLS در اولین رتبه قرار گرفته و به عنوان مناسب‌ترین شاخص کیفیت خاک می‌تواند تغییر در شیوه‌های مدیریتی و وضعیت کلی خاک در اثر جنگل‌تراشی در منطقه مورد مطالعه را نشان دهد. با توجه به کاهش میزان کیفیت خاک در کاربری زراعی، جلوگیری از تغییر کاربری اراضی از اقدامات ضروری به منظور مدیریت پایدار خاک در منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

داده اما در روش خطی، اختلاف معنی‌داری بین شاخص کیفیت خاک کاربری‌های مختلف مشاهده نشد. همچنین با در نظر گرفتن مجموع رتبه‌های شاخص حساسیت و نسبت کارایی برای اولویت‌دهی نهایی، رتبه بهتر روش نمره‌دهی غیر خطی در مقایسه با روش خطی در MDS₂ مشخص می‌شود. بنابراین می‌توان اظهار داشت که استفاده از روش‌های غیرخطی برای تعیین کیفیت خاک می‌تواند کارکردهای خاک را بهتر از روش خطی نشان دهد. شاخص کیفیت خاک با روش وزن‌دهی واریانس و نمره‌دهی غیرخطی در MDS₂ (SQIW₂-MDS₂-NLS) دارای بالاترین میزان شاخص حساسیت (۳/۱۴) بود. همچنین MDS₂ با دارا بودن میزان راندمان ۸۰

فهرست منابع

۱. بنایی م. ح. ۱۳۷۷. نقشه رژیم رطوبتی و حرارتی خاکهای ایران. مؤسسه تحقیقات خاک و آب. تهران، ایران.
۲. تقی پور، م.، یغمائی‌ان مهابادی، ن و م. شعبانپور شهرستانی. ۱۳۹۸. اثر تغییر کاربری اراضی بر میزان کربن آلی خاک در منطقه توتکابن استان گیلان. پژوهش‌های خاک، جلد ۳۳، شماره ۴، صفحه: ۵۷۷-۵۹۰.
۳. حمیدی نهرانی، س.، م. ص. عسکری، س. سعادت، م. الف. دلاور و م. طاهری. ۱۳۹۹. استفاده از تحلیل چندمتغیره به منظور ارزیابی کیفیت خاک در اراضی کشاورزی استان زنجان. تحقیقات کاربردی خاک، جلد ۸، شماره ۲، صفحه: ۱۷۳-۱۵۸.
4. Amoakwah, E., M.A. Rahman, K.A. Nketia, R. Djouaka, N.O. Didenko, and K.R. Islam. 2021. Impact of deforestation and subsequent land-use change on soil quality. *Eurasian Journal of Soil Science* 10(2): 150-160.
5. Armenise, E., M.A. Redmile-Gordon, A.M. Stellacci, A. Ciccarese, and P. Rubino. 2013. Developing a soil quality index to compare soil fitness for agricultural use under different managements in the Mediterranean environment. *Soil and Tillage Research* 130: 91-98.
6. Askari, M.S. and N.M. Holden. 2015. Quantitative soil quality indexing of temperate arable management systems. *Soil and Tillage Research* 150: 57-67.
7. Ayoubi, S., and S. Moazzeni Dehaghani. 2020. Identifying impacts of land use change on soil redistribution at different slope positions using magnetic susceptibility. *Arabian Journal of Geosciences* 13: 1-11.
8. Bakhshandeh, E., M. Hossieni, M. Zeraatpisheh, and R. Francaviglia. 2019. Land use change effects on soil quality and biological fertility: a case study in northern Iran. *European Journal of Soil Biology* 95: 103119.
9. Blake, G.R., and K.H. Hartge. 1986. Bulk density. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods* 5: 363-375.
10. Bremner, J.M. 1960. Determination of nitrogen in soil by the Kjeldahl method. *The Journal of Agricultural Science* 55(1): 11-33.

11. Chandel, S., M.S. Hadda, and A.K. Mahal. 2018. Soil quality assessment through minimum data set under different land uses of Submontane Punjab. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 49(6): 658-674.
12. Chen, Y.D., H.Y. Wang, J.M. Zhou, L. Xing, B.S. Zhu, Y.C. Zhao, and X.Q. Chen. 2013. Minimum data set for assessing soil quality in farmland of northeast China. *Pedosphere* 23(5): 564-576.
13. Davari, M., L. Gholami, K. Nabiollahi, M. Homaei, and H.J. Jafari. 2020. Deforestation and cultivation of sparse forest impacts on soil quality (case study: West Iran, Baneh). *Soil and Tillage Research* 198: 104504.
14. Dengiz, O. 2020. Soil quality index for paddy fields based on standard scoring functions and weight allocation method. *Archives of Agronomy and Soil Science* 66(3): 301-315.
15. Doran, J.W., and T.B. Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. *Defining soil quality for a sustainable environment* 35: 1-21.
16. Dou, Y., Y. Yang, S. An, and Z. Zhu. 2020. Effects of different vegetation restoration measures on soil aggregate stability and erodibility on the Loess Plateau, China. *Catena* 185: 104294.
17. Duan, L., H. Sheng, H. Yuan, Q. Zhou, and Z. Li. 2021. Land use conversion and lithology impacts soil aggregate stability in subtropical China. *Geoderma* 389: 114953.
18. Fathizad, H., M.A.H. Ardakani, B. Heung, H. Sodaiezhadeh, A. Rahmani, A. Fathabadi, T. Scholten, and Taghizadeh-Mehrjardi R. 2020. Spatio-temporal dynamic of soil quality in the central Iranian desert modeled with machine learning and digital soil assessment techniques. *Ecological Indicators* 118: 106736.
19. Gee, G.W., J.W. Bauder, and A. Klute. 1986. *Methods of soil analysis, part 1, physical and mineralogical methods*. Soil Science Society of America Book Series. American Society of Agronomy, Inc. and Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, 404-410.
20. Govaerts, B., K.D. Sayre, and J. Deckers. 2006. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil and tillage research* 87(2): 163-174.
21. Huang, W., M. Zong, Z. Fan, Y. Feng, S. Li, C. Duan, and H. Li. 2021. Determining the impacts of deforestation and corn cultivation on soil quality in tropical acidic red soils using a soil quality index. *Ecological Indicators* 125: 107580.
22. Karlen, D.L., C.A. Ditzler, and S.S. Andrews. 2003. Soil quality: why and how? *Geoderma* 114(3-4): 145-156.
23. Kemper, W.D., and R.C. Rosenau. 1986. Aggregate stability and size distribution.
24. Liu, M., G. Han, Z. Li, Q. Zhang, and Z. Song. 2019. Soil organic carbon sequestration in soil aggregates in the karst Critical Zone Observatory, Southwest China. *Plant, Soil and Environment* 65(5): 253-259.
25. Liu, M., G. Han, Z. Li, T. Liu, X. Yang, Y. Wu, and Z. Song. 2017. Effects of slope position and land use on the stability of aggregate-associated organic carbon in calcareous soils. *Acta Geochimica* 36(3): 456-461.
26. Mamehpour, N., S. Rezapour, and N. Ghaemian. 2021. Quantitative assessment of soil quality indices for urban croplands in a calcareous semi-arid ecosystem. *Geoderma* 382: 114781.

27. Marzaioli, R., R. d'Ascoli, R.A. De Pascale, and F.A. Rutigliano. 2010. Soil quality in a Mediterranean area of Southern Italy as related to different land use types. *Applied Soil Ecology* 44(3): 205-212.
28. Nabiollahi, K., F. Golmohamadi, R. Taghizadeh-Mehrjardi, R. Kerry, and M. Davari. 2018a. Assessing the effects of slope gradient and land use change on soil quality degradation through digital mapping of soil quality indices and soil loss rate. *Geoderma*, 318, 16-28.
29. Nabiollahi, K., R. Taghizadeh-Mehrjardi, and S. Eskandari. 2018b. Assessing and monitoring the soil quality of forested and agricultural areas using soil-quality indices and digital soil-mapping in a semi-arid environment. *Archives of Agronomy and soil science* 64(5): 696-707.
30. Nabiollahi, K., R. Taghizadeh-Mehrjardi, R. Kerry, and S. Moradian. 2017. Assessment of soil quality indices for salt-affected agricultural land in Kurdistan Province, Iran. *Ecological indicators* 83: 482-494.
31. Olsen, S.R., C.V. Cole, F.S. Watanable and L.A. Dean. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate; United States Department of Agriculture: Washington, D. C., USDA Circular 939.
32. Qi, Y., J.L. Darilek, B. Huang, Y. Zhao, W. Sun, and Z. Gu. 2009. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma* 149(3-4): 325-334.
33. Rahmanipour, F., R. Marzaioli, H.A. Bahrami, Z. Fereidouni, and S.R. Bandarabadi. 2014. Assessment of soil quality indices in agricultural lands of Qazvin Province, Iran. *Ecological indicators* 40: 19-26.
34. Raiesi, F. 2017. A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions. *Ecological Indicators* 75: 307-320.
35. Raiesi, F. and V. Kabiri. 2016. Identification of soil quality indicators for assessing the effect of different tillage practices through a soil quality index in a semi-arid environment. *Ecological Indicators* 71: 198-207.
36. Rezaee, L., A.A. Moosavi, N. Davatgar, and A.R. Sepaskhah. 2020. Soil quality indices of paddy soils in Guilan province of northern Iran: Spatial variability and their influential parameters. *Ecological Indicators* 117: 106566.
37. Rezapour, S., and O. Alipour. 2017. Degradation of Mollisols quality after deforestation and cultivation on a transect with Mediterranean condition. *Environmental Earth Sciences* 76(22): 1-13.
38. Rhoades, J.D. 1983. Soluble salts. In: A. L. Page (Eds.), *Methods of Soil Analysis: Part 2. Chemical and Microbiological Properties* ASA / SSSA, Madison, Wisconsin, USA, pp. 167-179.
39. Santos-Francés, F., A. Martínez-Graña, C. Ávila-Zarza, M. Criado, and Y. Sánchez. 2019. Comparison of methods for evaluating soil quality of semiarid ecosystem and evaluation of the effects of physico-chemical properties and factor soil erodibility (Northern Plateau, Spain). *Geoderma* 354: 113872.
40. Sione, S.M.J., M.G. Wilson, M. Lado, and A.P. González. 2017. Evaluation of soil degradation produced by rice crop systems in a Vertisol, using a soil quality index. *Catena* 150: 79-86.
41. Selmy, S. A., A. Al-Aziz, H., Salah, R. Jiménez-Ballesta, F. Jesús García-Navarro, and M.E. Fadl. 2021. Soil Quality Assessment Using Multivariate Approaches: A Case Study of the Dakhla Oasis Arid Lands. *Land* 10(10): 1074.
42. Sheidai Karkaj, E., A. Sepehry, H. Barani, J. Motamedi, and F. Shahbazi. 2019. Establishing a suitable soil quality index for semi-arid rangeland ecosystems in northwest of Iran. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 19(3): 648-658.

43. Sparks, D.L., A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Leoppert, N.P. Soltanpour, M.A. Tabatabai, G.T. Johnston, and M.E. Summer. 1996. *Methods of Soil Analysis*, Soil Science Society of American Journal. Book Series No. 5.
44. Tesfahunegn, G.B. 2014. Soil quality assessment strategies for evaluating soil degradation in Northern Ethiopia. *Applied and Environmental Soil Science* 2014.
45. Tufa, M., A. Melese, and W. Tena. 2019. Effects of land use types on selected soil physical and chemical properties: the case of Kuyu District, Ethiopia. *Eurasian Journal of Soil Science* 8(2): 94-109.
46. Vasu, D., S.K. Singh, S.K. Ray, V.P. Duraisami, P. Tiwary, P. Chandran, A.M. Nimkar, and S.G. Anantwar. 2016. Soil quality index (SQI) as a tool to evaluate crop productivity in semi-arid Deccan plateau, India. *Geoderma* 282: 70-79.
47. Walkley, A., and I.A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science* 37(1): 29-38.
48. Walling, D.E., and B.W. Webb. 1980. The spatial dimension in the interpretation of stream solute behavior. *Journal of Hydrology* 47(1-2): 129-149.
49. Yu, P., D. Han, S. Liu, X. Wen, Y. Huang, and H. Jia. 2018a. Soil quality assessment under different land uses in an alpine grassland. *Catena* 171: 280-287.
50. Yu, P., S. Liu, L. Zhang, Q. Li, and D. Zhou. 2018b. Selecting the minimum data set and quantitative soil quality indexing of alkaline soils under different land uses in northeastern China. *Science of the Total Environment* 616: 564-571.
51. Zaher, H., M. Sabir, H. Benjelloun, and H. Paul-Igor. 2020. Effect of forest land use change on carbohydrates, physical soil quality and carbon stocks in Moroccan cedar area. *Journal of environmental management* 254: 109544.
52. Zeraatpisheh, M., E. Bakhshandeh, M. Hosseini, and S.M. Alavi. 2020. Assessing the effects of deforestation and intensive agriculture on the soil quality through digital soil mapping. *Geoderma* 363: 114139.
53. Zhang, Y., X. Xu, Z. Li, C. Xu, and W. Luo. 2021. Improvements in soil quality with vegetation succession in subtropical China karst. *Science of the Total Environment* 775: 145876.
54. Zhao, F.Z., L. Bai, J.Y. Wang, J. Deng, J.C. Ren, X.H. Han, G.H. Yang, and J. Wang 2019. Change in soil bacterial community during secondary succession depend on plant and soil characteristics. *Catena* 173: 246-252.
55. Zhou, M., Y. Xiao, Y. Li, X. Zhang, G. Wang, J. Jin, G. Ding, and X. Liu. 2022. Soil quality index evaluation model in responses to six-year fertilization practices in Mollisols. *Archives of Agronomy and Soil Science* 68(2): 180-194.
56. Zuber, S.M., G.D. Behnke, E.D. Nafziger, M.B. Villamil. 2017. Multivariate assessment of soil quality indicators for crop rotation and tillage in Illinois. *Soil Tillage Research* 174:147–155



پایش تغییرات تنفسی خاک لوم‌شنی آلوده به نفتا سبک در تیمارهای مختلف زیست‌پالایی

زکيه عافيت، مریم نوروزپور، محمدرضا ساریخانی* و ناصر علی‌اصغرزاد

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

zakieh.afiati1994@gmail.com

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

Maryamnoroopoor72@gmail.com

دانشیار بیولوژی و بیوتکنولوژی خاک، گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، ایران؛

rsarikhani@yahoo.com

استاد بیولوژی و بیوتکنولوژی خاک، گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، ایران؛

n-aliasghar@tabrizu.ac.ir

« مقاله پژوهشی »

دریافت: ۱۴۰۲/۴/۵ و پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۰

چکیده

هیدروکربن‌های نفتی یکی از شایع‌ترین گروه‌های آلوده‌کننده آلی در محیط‌زیست می‌باشند. زیست‌پالایی خاک‌های آلوده به ترکیبات نفتی یک فرآیند مؤثر برای پاک‌سازی آلاینده‌های نفتی در محیط‌زیست است، در تحقیق حاضر در یک خاک لوم شنی برای کاهش یا از بین بردن آلاینده‌ی نفتا سبک با غلظت ۱٪ در خاک، از روش‌های مختلف زیست‌پالایی از جمله تحریک زیستی، تلقیح زیستی و تیمار تلفیقی (شامل تیمار توأم تلقیح زیستی و تحریک زیستی) استفاده شد. این آزمایش به‌صورت طرح اسپلیت‌پلات با سه عامل (آلودگی، زیست‌پالایی و زمان) با ۳ تکرار در گلدان‌های ۳ کیلوگرمی انجام شد. پس از اجرای آزمایش در فواصل زمانی صفر، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ روز، از گلدان‌های آزمایشی نمونه‌برداری شد و مقادیر تنفس پایه و برانگیخته اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که اعمال تیمارهای زیست‌پالایی باعث کاهش آلودگی نفتا سبک شده و همچنین آلودگی نفتی، فعالیت ریزجانداران (میکروارگانیزم‌ها) خاک را نیز تحت تأثیر قرار داد، به‌طوری‌که بیشترین مقدار تنفس پایه و برانگیخته در روزهای ابتدائی به دست آمد، اما باگذشت زمان تنفس پایه نسبت به تنفس برانگیخته افت شدیدتری داشت، به نظر جامعه میکروبی به گلوکز افزوده‌شده، به‌عنوان منبع کربن ساده و در دسترس پاسخ داده و تنفس برانگیخته کاهش کمتری داشت، اما تنفس پایه احتمالاً با کمبود منابع کربن مواجه شده و کاهش بیشتری داشت. از میان تیمارهای زیست‌پالایی، تیمار تلفیقی نسبت به دیگر تیمارهای زیست‌پالایی در سطح احتمال (P < ۰/۰۱) تأثیر بیشتری در کاهش هیدروکربن‌های نفتی داشت. به نظر کاربرد تیمارهای تلفیقی علاوه بر بالا بردن جمعیت میکروبی فعال درگیر در تجزیه ترکیبات نفتی و تأمین شرایط بهینه برای فعالیت آن‌ها، باعث تحریک جمعیت میکروبی بومی خاک شده و روشی مناسب برای حذف ترکیبات نفتی باشد.

کلمات کلیدی: تحریک‌زیستی، تلقیح‌زیستی، تنفس برانگیخته، تنفس پایه

* آدرس ایمیل نویسنده مسئول: rsarikhani@yahoo.com



مقدمه

فعالیت‌های مختلف از جمله اکتشافات نفت، حمل‌ونقل، نشت ناشی از تانکرهای نفتی و یا نشت نفت طی فرآیندهای مختلف بازیافت آن، منجر به انتشار مقدار بسیار زیادی از ضایعات هیدروکربنی به محیط‌زیست شده است که آلودگی‌های بزرگی را ایجاد می‌کند (پنگ و همکاران، ۲۰۰۸). وجود تولیدات پتروشیمی به مقدار بیش از ۳۰ میلیون تن در سال و وجود بیش از ۲۵۰۰۰ کیلومتر خطوط انتقال نفت و گاز و بیش از ۱۳۰۰ ایستگاه سوخت‌گیری و ۱۰۰۰۰ تانکر حمل نفت و فرآورده‌های نفتی در ایران، می‌تواند عاملی برای آلودگی منابع خاک و آب کشور به نفت و فرآورده‌های نفتی باشد (طلائی و همکاران، ۱۳۸۹). وجود هیدروکربن‌های نفتی در خاک، خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیست‌محیطی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد (راماداس و همکاران، ۲۰۱۵). در این میان نفتا به طبقه‌ای از سوخت‌های هیدروکربنی با اشتعال‌پذیری بالا گفته می‌شود که در برج تقطیر پالایش نفت خام بین گازهای سبک و نفت سفید قرار می‌گیرد. نفتا شامل هیدروکربن‌های دارای ۵ تا ۱۲ اتم کربن است، که نقطه‌جوش آن‌ها از ۳۰ تا ۲۰۰ درجه سلسیوس متغیر است. یعنی اگر نفت خام را از ۳۰ تا ۲۰۰ درجه سلسیوس حرارت دهیم و بخش جوشیده را جدا کنیم نفتا به دست خواهد آمد. معمولاً ۱۵ تا ۳۰ درصد نفت خام در این حرارت به جوش می‌آید در نتیجه همین میزان از نفت خام را می‌توان به‌طور مستقیم به نفتا تبدیل کرد. اما نفتا در بازار معمولاً در دو نوع نفتا سبک (هیدروکربن‌های ۵ و ۶ کربنی) و نفتا سنگین (هیدروکربن‌های ۶ تا ۱۲ کربنی) عرضه می‌شود (نوروزپور و همکاران، ۱۴۰۲). نفتا به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مواد اولیه مورد استفاده در صنعت پتروشیمی است. به‌طور مثال از نفتا به‌عنوان خوراک اصلی تولید فراورده‌های مختلف پتروشیمی از جمله حلال‌ها و رقیق‌کننده‌ها، مواد اولیه انواع پلاستیک، الیاف مصنوعی،

الکل‌های صنعتی و برای تولید مواد شوینده استفاده می‌کنند (نوروزپور و همکاران، ۱۴۰۲).

با توجه به اثرات مضر هیدروکربن‌های نفتی، اقدامات لازم برای کاهش سطح آن‌ها در محیط‌زیست ضروری است. روش‌های متعددی برای کاهش آثار زیست‌محیطی آلودگی نفتی توسعه یافته است، ولی مطالعه روی روش‌های ساده، سریع و ارزان‌قیمت در این زمینه ضروری است. یکی از بهترین روش‌های احیای خاک‌های آلوده استفاده از توانایی میکروارگانیسم‌ها در تجزیه ترکیبات سمی، طی فرآیند پاک‌سازی بیولوژیکی است. پاک‌سازی بیولوژیکی ترکیبات نفتی در خاک را می‌توان به‌وسیله تحریک میکروارگانیسم‌های بومی، افزایش مواد غذایی و اکسیژن به خاک یا تلقیح کنسرسیوم میکروبی به خاک بهبود بخشید (نوروزپور و همکاران، ۱۴۰۲). روش‌های زیست‌پالایی خاک به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: تلقیح زیستی و تحریک زیستی، که روش تلقیح زیستی به معرفی ریز جانداران بومی و غیربومی تخریب‌کننده نفت می‌پردازد که پس از جداسازی و شناسایی گونه‌های کارآمد تجزیه‌کننده نفت امکان تلقیح آن‌ها به خاک آلوده فراهم می‌شود (افشارنیا و همکاران، ۱۴۰۱). اما در روش تحریک زیستی، تشدید فعالیت سوخت‌وساز گونه‌های بومی تجزیه‌کننده نفت با اضافه کردن مواد مغذی و یا اصلاح‌گرهای آلی انجام می‌گیرد، تا حذف ترکیبات نفتی افزایش یابد (وو و همکاران، ۲۰۱۶). مرتضوی و همکاران (۲۰۱۳) طی مطالعه‌ای، تجزیه زیستی نفت خام را در حضور میکروارگانیسم‌های بومی خاک در رسوبات ساحلی شمال خلیج مکزیک در سه تیمار شاهد (شن و رسوبات ساحلی به‌تنهایی)، رسوبات آلوده به نفت خام و رسوبات آلوده به نفت خام همراه با ماده آلی را با همدیگر مقایسه کردند و نتایج نشان داد که تجزیه زیستی نفت خام در تیمار رسوبات آلوده به نفت به همراه ماده آلی حدود ۷۶٪ بیشتر از تجزیه زیستی ذاتی تیمار شاهد بود.

شاخص‌های بیولوژیکی عنوان یک روش مناسب برای بررسی اثر آلاینده در خاک هستند. ریزجانداران خاک، به کوچک‌ترین تنش‌های اکوسیستمی بسیار حساس بوده و با تنظیم میزان فعالیت، بیومس میکروبی و ساختار جامعه خود به سرعت در حال پاسخگویی به عوامل تنش‌زا می‌باشند. همچنین تنوع ساختاری یک جامعه باکتریایی نیز به تغییرات محیطی بسیار حساس است و در واکنش با آن‌ها تغییر می‌کند. تنفس خاک، تنفس برانگیخته و سهم متابولیکی (q_{CO2}) شاخص‌های حساسی برای تعیین اثر متغیرهای محیطی بر فعالیت میکروبی خاک هستند که از این پارامترها برای تجزیه و تحلیل اثر عوامل محیطی و تنش‌های وارده بر جمعیت میکروبی خاک بهره‌گیری می‌شود (نوروزپور و همکاران، ۱۴۰۲؛ مایلا و کلوت، ۲۰۰۵؛ میسیندرو و همکاران، ۲۰۱۳). تنفس یکی از مهم‌ترین فرآیندهای بیولوژیک خاک است، که توسط ریزجانداران خاک صورت می‌گیرد. تنفس ریزجانداران خاک فرآیندی انرژی‌زاست که طی آن ترکیبات آلی با مبادله جفت الکترون‌ها، اکسایش یافته و دی‌اکسیدکربن متصاعد می‌شود. به‌طور کلی عواملی نظیر دما، رطوبت، pH، میزان مواد آلی، نوع و وضعیت آن (تازه و پوسیده) بر فعالیت تنفسی ریز جانداران خاک تأثیر دارد. در شرایط آزمایشگاهی علاوه بر تنفس پایه و طبیعی خاک می‌توان با افزودن سوبسترا به خاک تنفس حاصل از سوبسترا (SIR) را اندازه‌گیری کرد (ابراهیمی و همکاران، ۲۰۱۹).

حسن شاهیان و همکاران (۱۳۸۹) برای تجزیه مواد مختلف هیدروکربنی دو سویه از باکتری‌های سودوموناس و / سینتوباکتر را از خلیج فارس جداسازی نمودند، آن‌ها میزان کارایی باکتری سودوموناس را در تجزیه نفت ۴۱ درصد گزارش کردند. افشارنیا (۱۳۹۷)، برای کاهش هیدروکربن‌های نفتی در خاک آلوده پالایشگاه تبریز از جدایه‌های باکتریایی تجزیه‌کننده نفت (شامل COD 1-1، COD 1-4، COD 2-1، COD 2-3 و COD 5-6) استفاده کردند و مشاهده کردند که تنفس پایه خاک در روزهای ابتدایی افزایش یافت ولی بعد از

گذشت چهار ماه تنفس پایه خاک کاهش نشان داد. آن‌ها دلیل این کاهش را کاهش مواد غذایی برای میکروب‌ها و رسیدن به فاز ثابت و مرگ میکروبی توجیه کردند. با این حال زیست پالایی خاک‌های آلوده به نفت می‌تواند به شدت تحت تأثیر ماهیت هیدروکربن‌ها و مدت زمان آلودگی قرار گیرد.

با توجه به تنوع ترکیبات نفتی و کاربرد آن‌ها در حوزه‌های مختلف، هدف این مطالعه اجرای روش‌های مختلف زیست پالایی از قبیل تحریک زیستی (شامل تأمین نیتروژن و فسفر (با نسبت C:N:P_{۲۰}:۵:۱)، افزودن کود دامی (۵٪ w-w) و سورفکتانت^۱ Tween 80 (۳٪ v-w))، تیمار تلقیح زیستی (استفاده از کنسرسيوم باکتریایی (*Arthrobacter* sp. COD2- (۵٪ v-w) ، *Stenotrophomonas nitritireducens* COD5-6 ، *S. acidaminiphila* COD1-1 به میزان (۵٪ v-w))، تیمار تلفیقی (شامل تیمار توأم تلقیح زیستی و تحریک زیستی) به منظور حذف زیستی ترکیب نفتی نفتا سبک است. علاوه بر مقایسه این روش‌ها با هم، بررسی روند تغییرات فعالیت تنفسی خاک در تیمارهای مورد استفاده بخش دیگری است که مورد توجه قرار می‌گیرد تا بتوان مقایسه‌ای بین خاک آلوده و شاهد تحت تأثیر تیمارهای مختلف انجام داد.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی خاک و اعمال تیمارهای زیست پالایی

در این آزمایش از یک خاک دارای بافت لوم شنی استفاده شد. خاک مورد نظر از ایستگاه خلعت پوشان دانشگاه تبریز نمونه برداری شد و برای استفاده در گلدان-های ۳ کیلوگرمی از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در (جدول ۱) آورده شده است.

¹ Surfactant

جدول ۱- نتایج تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش

رطوبت	آهک	بافت	شن (درصد)	سیلت (درصد)	رس (درصد)	درصد کربن آلی	پتاسیم قابل جذب (mg/kg) استات آمونیوم ۱N	فسفر قابل جذب (mg/kg) اولسن	EC _e (dS/m)	pH گل اشباع
ظرفیت مزرعه (درصد وزنی)	(درصد کربنات کلسیم معادل)									
۱۲/۵۷	۲/۸۵	Sandy Loam	۶۹	۱۳	۱۸	۰/۱۷	۱۹۸	۳	۱/۹۰	۷/۵۶

برای انجام آزمایش پس از آمیخته کردن خاک با نفتا سبک (به میزان ۱٪) و اعمال تیمارها، نمونه خاک در گلدان‌ها ریخته شد و سپس نمونه خاک‌های آلوده‌شده در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، به مدت ۱۲۰ روز نگهداری شدند. برای اجرای این آزمایش از تیمارهای مختلف زیست‌پالایی یعنی تحریک زیستی، تلقیح زیستی و روش تلفیقی استفاده شد. نمونه‌ها در طول آزمایش، هفته‌ای یک‌بار با روش مخلوط کردن هوادهی شدند و هفته‌ای دو بار رطوبت نمونه خاک‌ها با روش اسپری کردن آب روی نمونه خاک‌ها تا حد ۸۰-۷۰ درصد ظرفیت نگه‌داشت آب‌خاک (FC) تنظیم شد. قبل از شروع آزمایش با استفاده از صفحات فشاری FC خاک اندازه‌گیری شده بود. در روزهای ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ از هر گلدان به‌منظور اندازه‌گیری فعالیت زیستی تنفس پایه و تنفس برانگیخته نمونه‌برداری انجام شد. با توجه به توضیحات فوق فاکتورهای آزمایش شامل فاکتور آلودگی (وجود و عدم وجود آلودگی)، فاکتور زیست‌پالایی (شامل تیمار شاهد، تلقیح باکتری، تأمین نیتروژن و فسفر، استفاده از سورفکتانت، افزودن کود دامی و تیمار تلفیقی) بودند. تعداد تکرار در آزمایش نیز ۳ بوده است. با توجه به اینکه نمونه‌برداری در زمان‌های مختلف در طول آزمایش نیز وجود داشته است فاکتور سوم نیز زمان بوده است.

تلقیح زیستی و تحریک زیستی و تیمار تلفیقی

برای انجام تلقیح زیستی از جدایه‌های باکتریایی تجزیه‌کننده نفت (*Arthrobacter* sp. COD2-3، *Stenotrophomonas nitritireducens* COD5-6، *Stenotrophomonas acidaminiphila* COD1-1)

استفاده شد (افشارنیا و همکاران، ۱۴۰۱). جدایه‌های مورد استفاده در این آزمایش از بانک میکروبی گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه تبریز تهیه شدند. هر سه جدایه ابتدا به‌طور جداگانه در محیط کشت نوترینت براث به مدت ۲۴ ساعت در انکوباتور در دمای ۲۶ درجه سلسیوس کشت داده شدند و پس از رسیدن به جمعیت مناسب (10^8 CFU/ml) به میزان ۵٪ حجمی-وزنی (۱۵۰ میلی‌لیتر زادمایه باکتریایی در ۳۰۰۰ گرم خاک) به خاک‌های مورد آزمایش بر اساس چینش آزمایش تلقیح شدند. در تحریک زیستی، بعد از تهیه کود گاوی، کودها به مدت چهار روز هوا خشک شد و سپس از الک دو میلی‌متری عبور داده شد و با نسبت ۵٪ وزنی مورد استفاده قرار گرفت (افشارنیا و همکاران، ۱۴۰۱). کود مورد استفاده به ترتیب دارای ۲۴/۹۶، ۱/۵۲ و ۰/۵ درصد کربن، نیتروژن و فسفر بود. در مورد تیمار نیتروژن و فسفر که مربوط به تأمین عناصر نیتروژن و فسفر بود با توجه به نسبت ۲۰:۵:۱ (C:N:P)، جهت تأمین عناصر نیتروژن و فسفر به ترتیب از منابع نترات آمونیوم و فسفات پتاسیم استفاده شد (به‌عنوان نمونه در خاک آلوده با تیمار کود شیمیایی نیتروژن و فسفر، ۰/۷۹ گرم کود از منبع فسفات پتاسیم و ۳/۴ گرم کود از منبع نترات پتاسیم به ازای ۳ کیلوگرم خاک گلدان استفاده شد). همچنین جهت استفاده از سورفکتانت Tween 80 در تیمارهای مربوطه از نسبت ۰/۳ درصد حجمی-وزنی استفاده شد (دشتی و همکاران، ۲۰۱۵). در تیمار تلفیقی مخلوطی از کنسرسیوم باکتریایی با ۵٪ حجمی-وزنی، کود گاوی با ۵٪ وزنی-وزنی، کود شیمیایی نیتروژن و فسفر و سورفکتانت Tween 80 با ۰/۳٪ حجمی-وزنی استفاده شد. با توجه

به ۱۰ گرم خاک مرطوب همانند روش فوق اندازه‌گیری شد، با این تفاوت که CO₂ متصاعد شده پس از گذشت ۶ ساعت به روش تیتراسیون اندازه‌گیری شد.

تجزیه و تحلیل آماری

آزمایش به صورت طرح فاکتوریل اسپلیت پلات بر پایه طرح کاملاً تصادفی به اجرا درآمد، که در آن زمان (۹ زمان مختلف، از روز صفر تا ۱۲۰ روز)، آلایند (وجود و عدم وجود نفتا سبک) و تیمارهای زیست‌پالایی (شامل تیمار شاهد، تلقیح باکتری، تأمین نیتروژن و فسفر، استفاده از سورفکتانت، افزودن کود دامی و تیمار تلفیقی)، فاکتورهای سه‌گانه آزمایش بودند. مقایسه‌های میانگین در سطح احتمال یک درصد با آزمون LSD توسط نرم‌افزار آماری SPSS-24 انجام گرفت. نمودارها نیز توسط نرم‌افزار Excel ترسیم شدند.

نتایج و بحث

طبق نتایج حاصل از پایش فعالیت‌های زیستی خاک طی زیست‌پالایی، بین فاکتورهای آلودگی (خاک شاهد و خاک‌آلوده به نفتا سبک)، تیمارهای زیست‌پالایی (خاک شاهد بدون تیمار زیست‌پالایی، تلقیح کنسرسيوم باکتریایی، سورفکتانت Tween 80، کود شیمیایی نیتروژن و فسفر، کود گاوی و تلفیقی) و فاکتور زمان (۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ روز) در سطح احتمال ۱٪ ($P < 0.01$) اختلاف معنی‌داری وجود داشت (جدول ۲). با توجه به (شکل ۱)، مقدار تنفس پایه به ترتیب در تیمار تلفیقی، سورفکتانت Tween 80 و تلقیح کنسرسيوم باکتریایی بیشترین مقدار به دست آمد و پس از آن‌ها کود گاوی، خاک شاهد و کود شیمیایی نیتروژن و فسفر، از نظر مقدار BR در یک گروه آماری قرار گرفتند.

به توضیحات فوق تیمارهای آزمایشی مورد استفاده در این تحقیق شامل تیمار شاهد، تلقیح باکتری، تأمین نیتروژن و فسفر، استفاده از سورفکتانت، افزودن کود دامی و تیمار تلفیقی بود. قابل ذکر است که سورفکتانت‌های مختلف شیمیایی (نظیر توین ۸۰) و زیستی از طریق امولسیون نمودن ترکیبات نفتی باعث افزایش انحلال‌پذیری این ترکیبات در محیط آبی و در نتیجه افزایش دسترسی زیستی میکروارگانیسم‌های زنده به این ترکیبات و بهبود شرایط تجزیه و مصرف آن‌ها می‌شوند. همچنین تأمین عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم به مقدار و نسبت مناسب در پیشبرد زیست‌پالایی مؤثر است بدین خاطر در تحقیق حاضر با توجه به نتایج آنالیز خاک و حضور ماده نفتی صرفاً نیتروژن و فسفر مورد استفاده قرار گرفت که این تیمار خاص نیز به صورت اختصاری نیتروژن و فسفر نامگذاری شد.

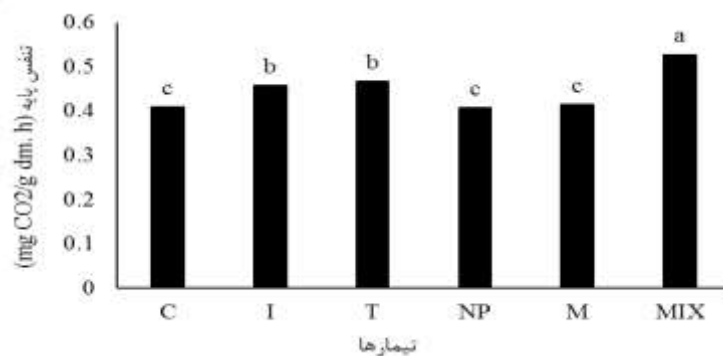
اندازه‌گیری تنفس پایه و تنفس برانگیخته

اندازه‌گیری تنفس پایه به روش تیتراسیون انجام شد (اندرسون، ۱۹۸۵). ۱۰ گرم خاک مرطوب به داخل ظرف شیشه‌ای درب‌دار ۱/۵ لیتری با ۱۰ میلی‌لیتر محلول هیدروکسید سدیم ۰/۱ مولار به مدت سه روز در دمای ۲۵ درجه سلسیوس گرماگذاری شد. پس از اتمام انکوباسیون، به منظور تعیین تنفس پس از تخلیه محلول هیدروکسید سدیم به درون ارلن، داخل ظرف دو مرتبه با ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر شستشو داده شد و سپس دو میلی‌لیتر محلول کلرید باریم ۰/۵ مولار اضافه شد و ۳-۴ قطره شناساگر فنل‌فتالین به محلول اضافه شد و با اسید کلریدریک ۰/۱ مولار تیترو شد. برای نمونه شاهد نیز همین مراحل کار بدون افزودن نمونه خاک اجرا شد. در تنفس برانگیخته پس از افزودن ۴۰ میلی‌گرم گلوکز (۰/۴ درصد)

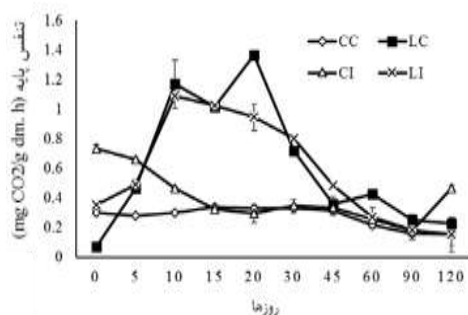
جدول ۲- تجزیه واریانس صفات اندازه‌گیری شده

میانگین مربعات			منابع تغییرات
تنفس پایه	تنفس برانگیخته	درجه آزادی	
۱/۶۰۵**	۱۰/۵۴۰**	۹	فاکتور زمان (A)
۰/۰۰۲	۰/۰۳۷	۲۰	خطا
۰/۱۳۰**	۱/۸۱۸**	۵	فاکتور تیمار زیست‌پالایی (B)
۰/۰۷۳**	۰/۵۱۹**	۴۵	اثر متقابل A×B
۳/۶۹۳**	۱۲/۱۳۷**	۱	فاکتور آلودگی (C)
۱/۲۱۴**	۴/۴۳۳**	۹	اثر متقابل A×C
۰/۱۲۱**	۰/۴۳۹**	۵	اثر متقابل B×C
۰/۰۷۱**	۰/۴۰۶**	۴۵	اثر متقابل A×B×C
۰/۰۰۷	۰/۰۳۹	۲۲۰	خطا
۱۸/۴۱	۶/۳۶	---	ضریب تغییرات %

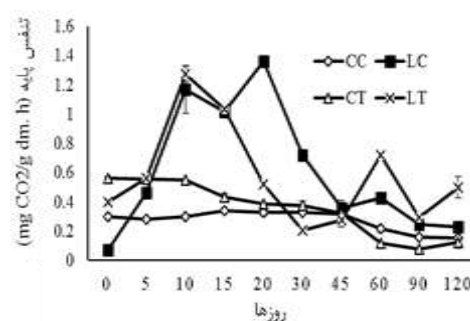
**معنی‌دار بودن در سطح احتمال ۱٪ ($P<0.01$)



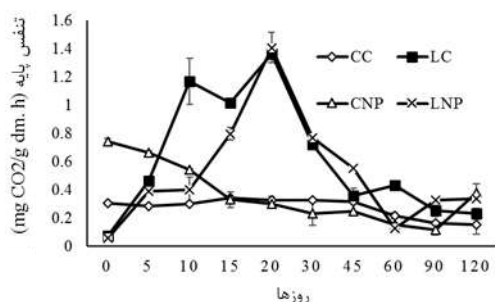
شکل ۱- مقادیر تنفس پایه اندازه‌گیری شده در خاک تحت تیمارهای مختلف زیست‌پالایی (خاک شاهد (C)، کنسرسیون باکتریایی (I)، سورفکتانت Tween 80 (T)، کود شیمیایی نیتروژن و فسفر (NP)، کود گاوی (M) و تیمار تلفیقی (MIX))



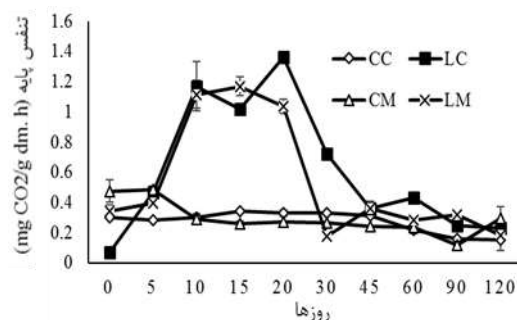
شکل ۲-الف) روند تغییرات زمانی مقادیر تنفس پایه در خاک شاهد بدون تیمار زیست‌پالایی (CC)، خاک شاهد تیمار شده با کنسرسیون باکتریایی (CI)، خاک آلوده به نفتا سبک بدون کنسرسیون باکتریایی (LC) و خاک آلوده تلقیح شده با کنسرسیون باکتریایی (LI)



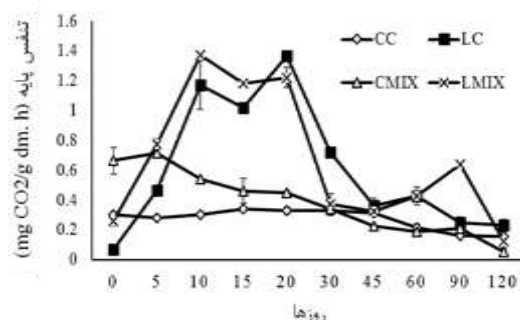
شکل ۲-ب) روند تغییرات زمانی مقادیر تنفس پایه در خاک شاهد بدون تیمار زیست‌پالایی (CC)، خاک شاهد تیمار شده با سورفکتانت Tween 80 (CT)، خاک آلوده به نفتا سبک بدون تیمار Tween 80 (LC) و خاک آلوده تیمار شده با Tween 80 (LT)



شکل ۲-ج) روند تغییرات زمانی مقادیر تنفس پایه در خاک شاهد بدون تیمار زیست‌پالایی (CC)، خاک شاهد تیمار شده با کود شیمیایی نیتروژن و فسفر (CNP)، خاک آلوده به نفتا سبک بدون تیمار کود شیمیایی نیتروژن و فسفر (CNP) و خاک آلوده به نفتا سبک تیمار شده با کود شیمیایی نیتروژن و فسفر (LNP)



شکل ۲-د) روند تغییرات زمانی مقادیر تنفس پایه در خاک شاهد بدون تیمار زیست‌پالایی (CC)، خاک شاهد تیمار شده با کود گاوی (CM)، خاک آلوده به نفتا سبک بدون تیمار کود گاوی (LC) و خاک آلوده تیمار شده با کود گاوی (LM)



شکل ۲- روند تغییرات زمانی مقادیر تنفس پایه در خاک شاهد بدون تیمار زیست‌پالایی (CC)، خاک شاهد تحت تیمار تلفیقی (CMIX)، خاک آلوده به نفتا سبک بدون تیمار تلفیقی (LC) و خاک آلوده با تیمار تلفیقی (LMIX)

است. اما تأثیر تلقیح زیستی روی تخریب نفت یک موضوع مهم و چالش‌برانگیز است. برخی مطالعات نشان می‌دهند که تلقیح زیستی تنها باعث افزایش راندمان تخریب هیدروکربن‌ها به‌طور موقت می‌شود در حالیکه تحریک زیستی یک روش زیست‌پالایی مناسب برای حذف مؤثر آلاینده‌ها است (کایوبی و همکاران، ۲۰۱۱).

زائو و همکاران (۲۰۱۱)، در آزمایش خود از کنسرسیوم باکتریایی شامل *Rhizobium* sp., *Microbacterium* sp., *Bacillus* sp., *Rhodococcus* sp., *Brucella* sp., *Pseudomonas* sp. و *Roseomonas* sp. استفاده کردند. تقریباً ۵۲/۱٪ نفت خام با غلظت اولیه ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر در ۳۰ درجه سانتی‌گراد طی هفت روز حذف شد، و میزان حذف هیدروکربن‌های آلیفاتیک و آروماتیک به ترتیب ۷۱/۴٪ و ۳۶٪ بوده است. نوروزپور و همکاران (۱۴۰۲)، در تحقیقی مشابه برای کاهش آلودگی هیدروکربن‌های نفتی، بعد از ایجاد ۷ درصد آلودگی نفتا سنگین از جدایه‌های باکتریایی (COD 2-3، COD 1-1 و COD 5-6)، استفاده کرد و نتایج ایشان نشان داد؛ مقدار تنفس پایه در نمونه خاک تلقیح شده با کنسرسیوم باکتریایی نسبت به نمونه خاک بدون تلقیح بیشتر است. تلقیح میکروبی در هر دو خاک آلوده و غیر آلوده در روزهای ابتدایی منجر به افزایش تنفس پایه خاک شده است، همچنین تنفس پایه در حضور آلاینده

طبق نتایج به‌دست‌آمده در تنفس پایه در تیمارهای کنسرسیوم باکتریایی (I) (شکل ۲-الف)، کود شیمیایی نیتروژن و فسفر (NP) (شکل ۲-ب)، تیمار Tween 80 (T) (شکل ۲-ج)، تیمار کود گاوی (M) (شکل ۲-د) و تلفیقی (MIX) (شکل ۲-ه) در روزهای ابتدایی با شیب زیاد افزایش و از روز ۱۵ تا ۳۰م با شدت کاهش‌یافته و بعد از روز ۳۰ با شیب کاهشی ملایم پیش رفته است. همچنین میزان تنفس پایه در تیمارهای تلفیقی، سورفکتانت Tween 80 و تلقیح کنسرسیوم باکتریایی بیشترین مقدار به دست آمد.

با توجه به (شکل ۲-الف)، افزایش معنی‌دار تنفس پایه در سطح احتمال یک درصد در روزهای ابتدایی نشان‌دهنده این است که میکروارگانیسم‌های موجود در خاک و میکروارگانیسم‌های افزوده‌شده به خاک، از هیدروکربن‌های نفتی به‌عنوان منبع کربن استفاده کرده‌اند و فعالیت میکروبی آن‌ها افزایش می‌یابد، اما همان‌طور که مشاهده می‌شود باگذشت زمان و کاهش میزان هیدروکربن‌های در دسترس، فعالیت و جمعیت میکروارگانیسم‌ها، و درنهایت میزان تنفس پایه اندازه‌گیری شده نیز کاهش‌یافته است. تلقیح زیستی زمانی نتیجه-بخش خواهد بود که آلاینده روی میکروارگانیسم‌های بومی خاک تأثیر منفی داشته باشد (وو و همکاران، ۲۰۱۳). بررسی‌ها نشان داده‌اند که روش تلقیح زیستی یک روش مناسب برای تخریب آلاینده‌های نفتی در خاک آلوده

(خاک آلوده به نفتای سنگین) نسبت به خاک شاهد بیشتر اندازه‌گیری شده است.

با توجه به (شکل ۲-ب)، میزان تنفس پایه در روزهای ابتدایی در سطح احتمال یک

درصد افزایش یافته است، به نظر می‌رسد علت زیاد شدن تنفس پایه در خاک آلوده و غیر آلوده در حضور سورفکتانت Tween 80، در روزهای ابتدایی این است که میکروارگانیسم‌ها از سورفکتانت Tween 80 به عنوان منبع کربن استفاده کرده‌اند و همچنین دلیل افزایش بیشتر تنفس پایه در خاک آلوده به نفتا سبک نسبت به خاک غیر آلوده این است که در حضور سورفکتانت Tween 80، فراهمی زیستی منابع کربن هیدروکربن‌های نفتی برای میکروارگانیسم‌ها زیاد می‌شود. و رناصری قندعلی و همکاران (۱۳۹۴) برای کاهش آلودگی نفت خام با آلودگی مصنوعی از پارامترهای شیمیایی و بیولوژیکی استفاده کردند. میزان تنفس میکروبی در تیمارهای تلقیح شده با کنسرسيوم باکتریایی (باکتری‌های سودوموناس پوتیدا و باسیلوس لاتروسپروس) به علاوه سورفکتانت Tween 20، بیشتر بوده و اختلاف معنی‌داری با تیمار شاهد داشت. ترکیبات نفتی سنگین به دلیل حلالیت پایین دارای ماندگاری بالا در محیط زیست هستند که این امر باعث کاهش دسترسی زیستی آن‌ها می‌شود (منیف و همکاران، ۲۰۱۵). سورفکتانت‌های مختلف شیمیایی و زیستی از طریق امولسیون نمودن هیدروکربن‌های نفت خام باعث افزایش انحلال پذیری این ترکیبات در محیط آبی و در نتیجه افزایش دسترسی زیستی میکروارگانیسم‌های زنده به این ترکیبات و بهبود شرایط تجزیه و مصرف آن‌ها می‌شوند (سوزا و همکاران، ۲۰۱۴). لای و همکاران (۲۰۰۹)، طی تحقیقی به بررسی اثر دو سورفکتانت زیستی رامنولپید، سورفاکتین و دو سورفکتانت شیمیایی توین ۸۰ و تریتون ایکس ۱۰۰ (مقادیر تمامی آن‌ها برابر ۰/۲٪ وزنی/ حجمی) در تجزیه زیستی نفت خام از خاک پرداختند و بیان کردند هر کدام از این ترکیبات میزان

تجزیه را به ترتیب ۲۳، ۱۴، ۶ و ۴٪ افزایش داده که رامنولپید بیشترین مقدار تغییر مثبت را نشان داد.

با توجه به (شکل ۳-ج)، میزان تغییرات تنفس پایه در نمونه خاک‌های آلوده به نفتا سبک نسبت به نمونه خاک‌های بدون آلودگی به خصوص در روزهای ابتدایی بیشتر است. به نظر می‌رسد در روزهای ابتدایی چون منبع غذایی در دسترس میکروارگانیسم‌ها زیاد است میزان تنفس نیز در این دوره افزایشی است، ولی با گذشت زمان و مصرف شدن هیدروکربن‌های موجود در خاک و در نتیجه تنفس پایه روند کاهشی داشته است. کمتر بودن میزان تنفس پایه در تیمار LNP نسبت به LC، به ویژه در فاصله ۵ تا ۲۰ روز را شاید بتوان این گونه عنوان داشت که اضافه شدن کود شیمیایی نیتروژن و فسفر کمک نموده است تا شرایط ایده‌آل‌تری برای میکروارگانیسم‌ها از نظر افزایش بیومس کربن فراهم شود و به جای اینکه کربن موجود در نفتا سبک را بیشتر به شکل CO₂ دفع نمایند در زی توده خود ذخیره نموده‌اند. نوروزپور و همکاران (۱۴۰۲)، برای کاهش آلودگی هیدروکربن‌های نفتی، بعد از ایجاد ۷ درصد آلودگی نفتا سنگین از کود شیمیایی نیتروژن و فسفر با نسبت ۱:۵:۲۰ C/N/P استفاده کردند. در نتایج آن‌ها نیز میزان تنفس پایه در نمونه خاک‌های تحت تیمار کود شیمیایی نیتروژن و فسفر نسبت به نمونه خاک‌های بدون کود شیمیایی نیتروژن و فسفر در روزهای ابتدایی بیشتر بود و با گذشت زمان و کاهش منبع کربن نفتی میزان تنفس آن‌ها نیز کاهش یافت. جعفری و همکاران (۱۳۹۲) طی تحقیقی در خاک آلوده به نفت کوره واقع در شرکت ملی پخش و پالایش فرآورده‌های نفتی در شهرستان شاهرود، کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم را در دو نسبت ۱:۱:۱۰ و ۱:۲:۲۰ و کمپوست زباله شهری را در سه سطح ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد جداگانه به گلدان‌ها اعمال کردند و در مدت ۱۲ هفته مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که بیشترین مقدار تجزیه مربوط به تیمار کمپوست زباله شهری با نسبت ۱۵ درصد و کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم با نسبت ۱:۲:۲۰ بود که

به ترتیب ۵۹٪ و ۶۲٪ از نفت کاهش یافته بود. با افزودن نیتروژن، فسفر و پتاسیم میزان سرعت تنفس میکروبی به دلیل مصرف ترکیبات آسان تجزیه پذیر به شدت افزایش یافت. سپس سرعت تنفس میکروبی به دلیل وجود ترکیباتی با وزن مولکولی بالا، کاهش پیدا کرده و از تعداد میکروارگانیسم‌ها نیز کاسته شده و ادامه تجزیه با کندی همراه بود. والورث و همکاران (۱۹۹۵) به این نتیجه رسیدند که تجزیه هیدروکربن‌های خاک را می‌توان به وسیله کاربرد عناصر غذایی مانند نیتروژن و به مقدار کمی فسفر افزایش داد. تجزیه نفت به علت وارد کردن مقادیر عظیم کربن آلی به خاک باعث افزایش نسبت C/N می‌شود که برای رشد و فعالیت میکروارگانیسم‌های خاک نامناسب است، اما با تأمین مواد غذایی معدنی از طریق کوددهی می‌توان این نسبت را تعدیل کرد (کیم و همکاران، ۲۰۰۵). هوادهی فعال و افزایش عناصر غذایی ازت و فسفر در قالب یک فرایند زیست‌پالایی اثر معنی‌داری بر تحرک و تنوع باکتری‌های تجزیه‌کننده هیدروکربن در خاک آلوده به نفت ایجاد می‌کند (آرامسای و همکاران، ۲۰۰۰).

با توجه به (شکل ۲-د)، همانطور که در تیمارهای قبلی هم مشاهده شد میزان تنفس پایه در خاک‌های آلوده در روزهای ابتدایی بسیار بیشتر از خاک بدون آلودگی (شاهد) بود. در خاک‌های آلوده شده با نفتا سبک چون میزان هیدروکربن در دسترس میکروارگانیسم‌ها زیاد است، از آن به عنوان منبع کربن استفاده کرده و فعالیت و در نتیجه میزان تنفس آن‌ها نیز افزایش یافته است. دلیل بالا بودن تنفس پایه در تیمار کود گاوی در روزهای ابتدایی ناشی از: ۱) میکروارگانیسم‌های بومی موجود در کود گاوی، ۲) بهبود خواص فیزیکی خاک و افزایش تهویه خاک در نتیجه کاربرد کود گاوی، ۳) وجود عناصر غذایی در کود گاوی و تأمین منبع غذایی برای میکروارگانیسم‌ها، است. اما با گذشت زمان و کاهش منبع غذایی و میزان آلاینده میزان تنفس پایه نیز کاهش یافته است. افشارنیا (۱۳۹۷)، برای کاهش آلودگی نفت خام در خاک آلوده در

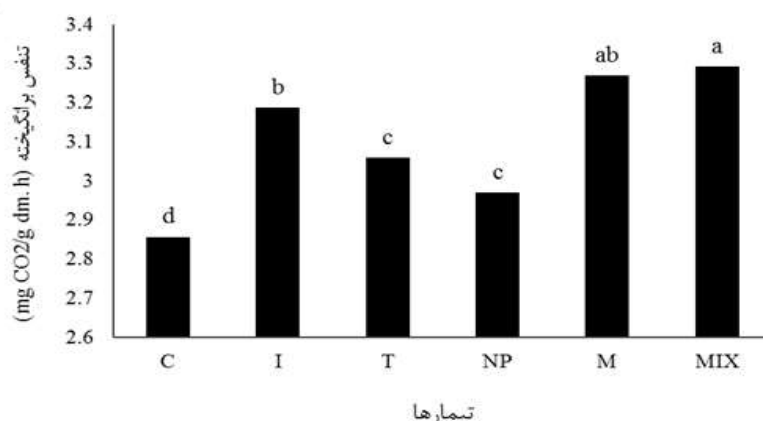
پالایشگاه تبریز از کود گاوی به میزان ۵٪ (وزنی-وزنی) استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در روزهای ابتدایی تنفس پایه خاک افزایش یافته بود و پس از ۴ ماه تنفس پایه خاک کاهش چشمگیری داشت دلیل این امر را می‌توان به کاهش عناصر غذایی برای میکروارگانیسم‌های خاک و رسیدن به فاز ثابت و مرگ میکروبی مربوط دانست. کود گاوی علاوه بر فراهم کردن مواد مغذی بر میکروارگانیسم‌ها به دلیل بهبود خواص فیزیکوشیمیایی خاک‌های آلوده باعث سازگاری سریع میکروب‌ها به خاک آلوده شده و نهایتاً منجر به افزایش فعالیت میکروبی و تجزیه بالای ترکیبات نفتی در خاک شده است (افشارنیا، ۱۳۹۷). مینایی تهرانی و همکاران (۱۳۸۴)، برای زیست-پالایی خاک آلوده به نفت خام سنگین ۲ درصد از مواد افزودنی از قبیل کود شیمیایی نیتروژن و فسفر، کود حیوانی ۵ درصد به عنوان مکمل و تراشه‌های چوب استفاده نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد؛ کود حیوانی سبب افزایش عناصر مورد نیاز برای تکثیر باکتری‌ها و افزایش جمعیت آن‌ها در خاک شد. و همچنین بیشترین کاهش به میزان ۶۵ درصد در تیماری که به آن هم‌زمان کود شیمیایی و تراشه چوب افزوده شده بود اتفاق افتاد. مقدار کاهش در تیماری که به آن کود حیوانی اضافه شده بود حدود ۶۰ درصد و استفاده از کود شیمیایی به تنهایی باعث کاهش نفت در حدود ۵۵ درصد شده بود.

با توجه به (شکل ۲-ه)، در حالت کلی میزان تنفس پایه در خاک آلوده تحت تیمار تلفیقی بیشتر از خاک آلوده بدون تیمار تلفیقی بود. به نظر می‌رسد افزایش تنفس پایه در خاک‌های تحت تیمار تلفیقی به علت حضور سورفکتانت تویین ۸۰ که به فراهمی زیستی هیدروکربن‌ها کمک کرده، همچنین وجود کود شیمیایی نیتروژن و فسفر و کود گاوی به تحریک زیستی کمک کرده است و در نتیجه میزان فعالیت جمعیت میکروبی افزوده شده به خاک و جمعیت میکروبی بومی خاک افزایش یافته است. اگرچه افزایش تنفس میکروبی در مواردی به مصرف ترکیبات سهل‌التجزیه نسبت داده می‌-

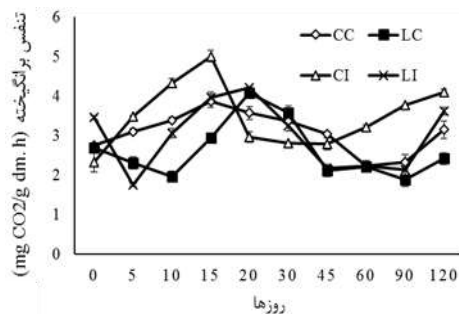
تنفس برانگیخته

نتایج به‌دست‌آمده از تنفس برانگیخته (SIR) نشان داد که بین فاکتور آلودگی (خاک شاهد و خاک‌آلوده به نفتا سبک)، فاکتور تیمارهای زیست‌پالایی (خاک شاهد بدون تیمار زیست‌پالایی، تلقیح کنسرسیوم باکتریایی، سورفکتانت Tween 80، کودهای شیمیایی نیتروژن و فسفر، کود گاوی و تلفیقی) و فاکتور زمان (۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ روز) در سطح احتمال ۱٪ ($P < 0.01$) اختلاف معنی‌دار وجود دارد. با توجه به شکل ۳، نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر فاکتور تیمارهای زیست‌پالایی در سطح احتمال ۱ درصد بر تنفس برانگیخته اثر معنی‌داری داشت. طبق مقایسات میانگین بیشترین تنفس برانگیخته به ترتیب مربوط به تیمار تلفیقی، کود گاوی و تیمار کنسرسیوم باکتریایی است و پس از آن تیمار Tween 80، کود شیمیایی نیتروژن و فسفر و خاک شاهد در رتبه‌های بعدی هستند. به نظر می‌رسد گروه‌های میکروبی موجود در تیمارهای تلفیقی، کود گاوی و افزودن مایه تلقیح باکتریایی به گلوکز مصرف‌شده پاسخ داده و میزان تنفس برانگیخته را افزایش داده‌اند.

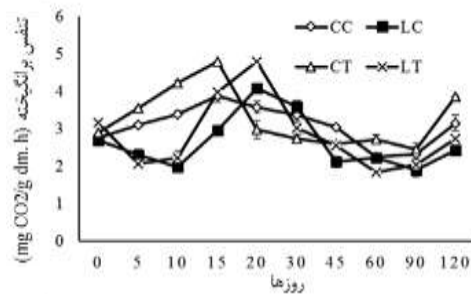
شود و در ادامه به دلیل وجود مواد با وزن ملکولی بالاتر و کمتر مورد استفاده قرار گرفتن آن توسط جامعه میکروبی باعث کاهش تنفس می‌شود (جعفری و همکاران، ۱۳۹۲). اما در آزمایش پیش‌رو نفتا سبک استفاده‌شده به‌عنوان یک منبع کربن ۵ تا ۶ کربنه شناخته می‌شود که به نظر به‌راحتی مورد استفاده ریز جانداران قرار می‌گیرد و پس از مصرف آن روند تغییرات تنفس ثابت شده است. گومز و سرتاج (۲۰۱۴)، برای خاک مزرعه آلوده به نفت با غلظت ۹۴۰ میکروگرم بر گرم از تلقیح زیستی (استفاده از کنسرسیوم میکروبی) و تحریک زیستی (استفاده از کمپوست آلی) به‌عنوان تیمار زیست‌پالایی استفاده کردند. استفاده از کنسرسیوم میکروبی و کمپوست آلی نشان داد که کارایی حذف به ترتیب ۵۵٪ و ۵۲٪ بود. ولی در خاک‌آلوده به نفت با غلظت ۱۶۶ میکروگرم بر گرم از مخلوط کنسرسیوم میکروبی و کمپوست استفاده شد و در مدت ۴۰ روز، کاهش آلودگی به میزان ۸۲٪ مشاهد شد.



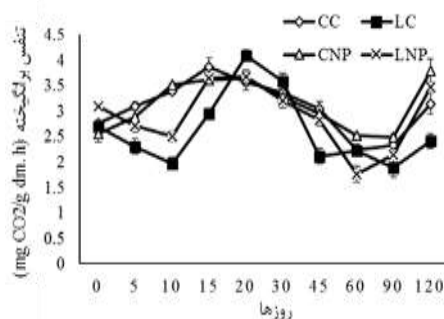
شکل ۳- مقادیر تنفس برانگیخته اندازه‌گیری شده در خاک تحت تیمارهای مختلف زیست‌پالایی (خاک شاهد (C)، کنسرسیوم باکتریایی (I)، سورفکتانت Tween 80 (T)، کود شیمیایی نیتروژن و فسفر (NP)، کود گاوی (M) و تیمار تلفیقی (MIX))



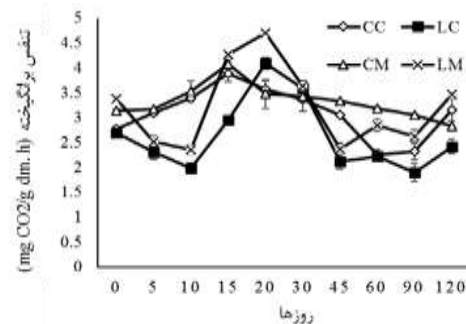
شکل ۴-الف) روند تغییرات زمانی مقادیر تنفس برانگیخته در خاک شاهد بدون تیمار زیست‌پالایی (CC)، خاک شاهد تیمار شده با کنسرسیون باکتریایی (CI)، خاک آلوده به نفتا سبک بدون کنسرسیون باکتریایی (LC) و خاک آلوده تلقیح شده با کنسرسیون باکتریایی (LI)



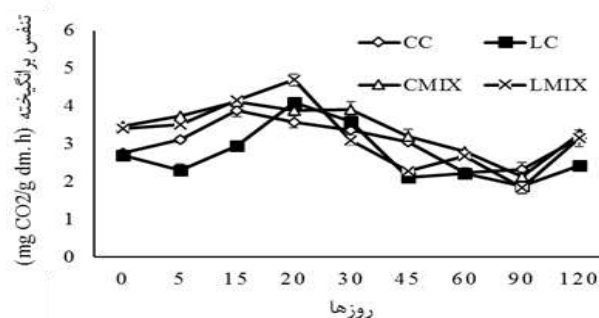
شکل ۴-ب) روند تغییرات زمانی مقادیر تنفس برانگیخته در خاک شاهد بدون تیمار زیست‌پالایی (CC)، خاک شاهد تیمار شده با سورفکتانت Tween 80 (CT)، خاک آلوده به نفتا سبک بدون تیمار Tween 80 (LC) و خاک آلوده تیمار شده با Tween 80 (LT)



شکل ۴-ج) روند تغییرات زمانی مقادیر تنفس برانگیخته در خاک شاهد بدون تیمار زیست‌پالایی (CC)، خاک شاهد تیمار شده با کود شیمیایی نیتروژن و فسفر (CNP)، خاک آلوده به نفتا سبک بدون تیمار کود شیمیایی نیتروژن و فسفر (LC) و خاک آلوده به نفتا سبک تیمار شده با کود شیمیایی نیتروژن و فسفر (LNP)



شکل ۴-د) روند تغییرات زمانی مقادیر تنفس برانگیخته در خاک شاهد بدون تیمار زیست‌پالایی (CC)، خاک شاهد تیمار شده با کود گاوی (CM)، خاک آلوده به نفتا سبک بدون تیمار کود گاوی (LC) و خاک آلوده تیمار شده با کود گاوی (LM)



شکل ۴-ه) روند تغییرات زمانی مقادیر تنفس برانگیخته در خاک شاهد بدون تیمار زیست‌پالایی (CC)، خاک شاهد تحت تیمار تلفیقی (CMIX)، خاک آلوده به نفتا سبک بدون تیمار تلفیقی (LC) و خاک آلوده با تیمار تلفیقی (LMIX)

طبق نتایج به‌دست‌آمده در تنفس برانگیخته در تیمارهای کنسرسیوم باکتریایی (I) (شکل ۴-الف)، کود شیمیایی نیتروژن و فسفر (NP) (شکل ۴-ب)، تیمار توئین ۸۰ (T) (شکل ۴-ج)، تیمار کود گاوی (M) (شکل ۴-د) و تیمار تلفیقی (MIX) (شکل ۴-ه)، مقدار تنفس برانگیخته در خاک‌های تحت تیمارهای زیست‌پالایی نسبت به نمونه خاک‌های بدون تیمار زیست‌پالایی بیشتر است. درواقع گلوکز افزوده‌شده باعث تحریک بیشتر میکروارگانیسم‌های موجود در خاک شده و میزان تنفس ناشی از سوبسترا را افزایش داده است. اما با گذشت زمان و مصرف شدن منابع کربنی اعم از گلوکز یا نفتا سبک و دیگر عناصر غذایی در خاک‌های آلوده و شاهد میزان تنفس برانگیخته نیز کاهش پیدا کرده است. همان‌گونه که از شکل مشخص است (تا ۱۰ روز تحت) در خاک‌های آلوده‌شده با نفتا سبک، جمعیت میکروبی با شوک مواجه بوده‌اند و میزان تنفس برانگیخته کاهش یافته است. به نظر در این فاصله زمانی گروه‌های میکروبی حساس حذف شده‌اند و به مرور شاهد نمونه‌گیری جامعه میکروبی به آلاینده و افزایش SIR هستیم. اما در مورد خاک‌های غیرآلوده که به نظر با کمبود منابع کربنی یا ماده آلی مواجه بوده‌اند به محض افزودن گلوکز، تنفس برانگیخته افزایش یافته و به‌طوری‌که تا روز ۱۵ به بیشترین مقدار خود رسیده است. با توجه به اینکه میزان تنفس برانگیخته در خاک‌های تیمار شده با کنسرسیوم باکتریایی نسبت به خاک‌های تیمار نشده به‌خصوص در روزهای ابتدایی زیاد است، به نظر می‌رسد جدایه‌های باکتریایی اضافه‌شده در هر دو خاک آلوده و شاهد باعث این افزایش شده و همچنین در خاک آلوده میکروارگانیسم‌های خاک از منبع آلودگی (نفتا سبک) به‌عنوان منبع کربن استفاده کرده‌اند اما باگذشت زمان و کاهش غلظت آلاینده‌ها تنفس برانگیخته و جمعیت میکروبی نیز کاهش یافته است (شکل ۴-الف). رجایی و همکاران (۱۳۹۱) برای پاک‌سازی خاک آلوده به نفت خام هم‌زمان از تکنیک‌های بیولوژیکی و گیاه‌پالایی استفاده کردند. برای این منظور محیط کشت

مخلوطی از باکتری‌های تجزیه‌کننده نفت خام را تهیه و در خاک آلوده با غلظت ۱۰ درصد تلقیح کردند. به‌طورکلی SIR ارتباط نزدیکی با ماده آلی سهل‌الوصول و توده زنده میکروبی داشت، اندرسون و همکاران (۱۹۸۵) با افزودن گلوکز تنفس میکروبی همواره افزایش یافت. افزایش SIR در خاک آلوده ممکن است به دلیل بالا بودن توده زنده میکروبی جوان و فعال باشد. معمولاً SIR نشان‌دهنده جمعیت جوان و فعال در خاک است (کوزیاکو، ۲۰۰۲). از طرف دیگر افزایش SIR در خاک آلوده ممکن است به دلیل عدم دسترسی آسان میکروارگانیسم‌های خاک به سوبسترای نفتی یا تجزیه‌پذیری اندک ترکیبات نفتی باقی‌مانده در این خاک‌ها نیز باشد (رجایی و همکاران، ۱۳۹۱).

با توجه به (شکل ۴-ب)، میزان تنفس برانگیخته در خاک آلوده تیمار شده سورفکتانت Tween 80 (LT)، نسبت به خاک آلوده بدون تیمار سورفکتانت Tween 80 (LC) در روزهای ابتدایی بیشتر و در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار است. از روز ۲۰ به بعد کمی کاهش پیدا کرده است. به نظر خود ماده توئین به‌عنوان منبع کربن مورد استفاده جامعه میکروبی قرار گرفته و دلیل افزایش SIR به‌ویژه تا روز ۱۵ در نمونه خاک‌های غیر آلوده به نفتا سبک است. اما در مورد خاک‌های آلوده حضور نفتا سبک تا ۱۰ روز تحت اثر کاهشی بر SIR داشته که شاید به دلیل سمیت این ماده به جامعه میکروبی و وارد کردن شوک بر آن باشد، اما بعدازآن به‌مرور افزایش یافته و در حضور توئین در روز ۲۰ بالاترین مقدار تنفس SIR به ثبت رسیده است. همچنین دلیل افزایش تنفس برانگیخته در روزهای ابتدایی می‌تواند ناشی از این باشد که سورفکتانت Tween 80 با افزایش فراهمی زیستی ماده نفتی باعث شده هیدروکربن‌های نفتی خاک به‌راحتی در دسترس میکروارگانیسم‌های بومی خاک قرار بگیرند و میزان تجزیه نفت و تنفس برانگیخته افزایش یابد. اما با گذشت زمان و کاهش منبع هیدروکربنی و جمعیت بومی خاک، تنفس برانگیخته نیز کاهش یافته است. حلالیت

هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای در محلول‌های آبی بسیار کم بوده و دسترسی زیستی این ترکیبات یک عامل محدودکننده برای حمله قارچی و میکروبی به آن‌هاست به همین منظور اضافه کردن سورفکتانت‌هایی از قبیل تویین ۸۰ موجب افزایش حلالیت و دسترسی زیستی این ترکیبات می‌شود (مبائو دانگ و همکاران، ۲۰۰۶).

با توجه به (شکل ۴-ج)، میزان تنفس برانگیخته در خاک آلوده تیمار شده با کود شیمیایی نیتروژن و فسفر تا روز ۱۰ کمی کاهش داشته و سپس از روز ۱۰ تا ۲۰ افزایش، از ۲۰ تا ۶۰ کاهش و از روز ۶۰ به بعد دوباره افزایش یافته است. به نظر می‌رسد از روز ۱۰ تا ۲۰ در خاک آلوده تیمار شده با کود شیمیایی نیتروژن و فسفر، باکتری‌های بومی خاک از عناصر غذایی نیتروژن و فسفر و منبع هیدروکربن نفتی تغذیه کرده‌اند و میزان فعالیت و جمعیت میکروبی و در نتیجه تنفس برانگیخته افزایش یافته است اما باگذشت زمان و کاهش منبع غذایی و منبع کربن، فعالیت و جمعیت میکروبی نیز کاهش یافته است. وجود عناصر غذایی کافی یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در افزایش ریز جانداران خاک است و زمانی که مواد غذایی خاک پاسخگوی جامعه میکروبی نباشد ریز جانداران حساس از بین خواهند رفت (چاندر و همکاران، ۲۰۰۶). شریفی حسینی و همکاران (۱۳۸۸) با به‌کارگیری نفت خام با غلظت ۱٪ و کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم، با غلظت صفر، ۱ و ۲ تن در هکتار، میزان تجزیه آلودگی نفتی خاک را ۴۵-۶۰ درصد گزارش دادند، همچنین بر اساس نتایج آن‌ها جمعیت باکتری‌های هتروتروفیک تجزیه‌کننده از 6×10^3 کلونی در واحد گرم خاک در نمونه شاهد به حدود $4/1 \times 10^8$ در نمونه‌های تیمار شده با ۲ تن در هکتار کود شیمیایی در مدت ۵ هفته رسید و نسبت C/N در خاک از ۶ به ۳ کاهش یافت. گوگی و همکاران (۲۰۰۳) در مطالعه زیست‌پالایی خاک‌های آلوده به نفت خام در محل نشت نفت مشاهده کردند که هوادهی، کاربرد کودهای دارای نیتروژن و فسفر و تلقیح میکروبی باعث تجزیه ۷۵ درصد از نفت خام می‌شود. مارگزین

(۲۰۰۰) گزارش داد؛ که تحریک بیولوژیکی خاک‌های آلوده به نفت با عناصر غذایی مانند کود شیمیایی حاوی نیتروژن، فسفر و پتاسیم باعث افزایش تجزیه زیستی و تجزیه هیدروکربن‌ها به میزان ۲۷ تا ۵۳ درصد می‌شود.

با توجه به (شکل ۴-د)، دلیل افزایش تنفس برانگیخته در حضور کود گاوی چه در خاک آلوده و چه در خاک غیرآلوده (شاهد) را می‌توان در وجود منابع غذایی (کربن و سایر عناصر غذایی) موردنیاز جامعه میکروبی و بهبود شرایط فیزیکی خاک (نظیر تهویه و...) جستجو کرد. هرچند اثر افزایشی SIR در خاک آلوده به نفتا سبک با افزودن کود گاوی بیش از خاک شاهد است و این بیانگر آن است که کود دامی شرایطی را فراهم کرده که دسترسی نفتا سبک برای جامعه میکروبی جهت تجزیه بیشتر شده است. هارتیش و کواشیک (۲۰۰۹) گزارش کردند؛ استفاده از کود گاوی، خوکی، کمپوست و کاه و کلش موجب بهبود ساختمان خاک و اکسیژن‌رسانی و تأمین انرژی برای جمعیت میکروبی خاک شده و باعث افزایش تجزیه PAHها در خاک می‌گردد. بطوریکه افزودن کود گاوی و خوکی موجب تجزیه ۹۰ درصدی آن‌ها در عرض پنج هفته گردید و بیشترین اثر آن بر روی PAHهای سه حلقوی مانند فناترن و آنتراسن دیده شد و از این روش می‌توان در حذف PAHها در فرایند کمپوست سازی نیز استفاده کرد.

با توجه به (شکل ۴-ه)، تنفس برانگیخته در خاک آلوده تحت تیمار تلفیقی (LMIX) نسبت به خاک آلوده بدون تیمار تلفیقی (LC)، در روزهای ابتدایی بیشتر است اما باگذشت زمان روند تغییرات تنفس برانگیخته در هر دو به یکدیگر نزدیک می‌شود. با توجه به اینکه میزان تنفس برانگیخته در خاک‌های تحت تیمار تلفیقی نسبت به خاک‌های تیمار نشده به‌خصوص در روزهای ابتدایی زیاد است، به نظر دلیل این افزایش حضور جدایه‌های باکتریایی، سورفکتانت تویین ۸۰، کود شیمیایی نیتروژن و فسفر و کود گاوی مورد استفاده در تیمار تلفیقی است. جدایه‌های باکتریایی افزوده شده و

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر برای کاهش آلودگی ناشی از نفتا سبک در خاک بدون آلودگی، مطالعه‌ای بر روی انواع روش‌های زیست‌پالایی صورت گرفته است. بدین منظور در این پژوهش از تیمارهای تحریک زیستی، تلقیح زیستی و تیمار تلفیقی (شامل تیمار توأم تلقیح زیستی و تحریک زیستی) استفاده شد. نتایج حاصل از پایش فعالیت‌های بیولوژیکی (تنفس پایه و برانگیخته) در خاک‌آلوده به نفتا سبک نشان دادند باینکه هرکدام از تیمارهای استفاده‌شده به‌تنهایی باعث کاهش هیدروکربن‌های نفتی شدند، اما در تیمار تلفیقی که شامل کاربرد توأم تحریک زیستی و تلقیح زیستی بود نتیجه مطلوب‌تری نسبت به کاربرد جداگانه تیمارها به‌دست‌آمده. با توجه به نتایج حاصل از پایش زیست‌پالایی به نظر استفاده از تیمار تلفیقی (استفاده مخلوطی از کنسرسیوم باکتریایی با ۵٪ حجمی - وزنی، کود گاوی با ۵٪ وزنی-وزنی، کود شیمیایی نیتروژن و فسفر و سورفاکتانت Tween 80 با ۰/۳٪ حجمی - وزنی) علاوه بر بالا بردن جمعیت میکروبی فعال درگیر در تجزیه ترکیبات نفتی و تأمین شرایط بهینه برای فعالیت آن‌ها، همچنین تحریک جمعیت میکروبی بومی خاک، روشی مناسب برای حذف ترکیبات نفتی باشد.

میکروارگانسیم‌های بومی خاک با کمک سورفاکتانت توئین ۸۰ دسترسی بیشتری به منبع هیدروکربن‌های نفتی خواهند داشت، از طرفی با تأمین عناصر غذایی و بهبود شرایط فیزیکی خاک با استفاده از کود شیمیایی نیتروژن و فسفر و کود گاوی، میزان تنفس برانگیخته افزایش می‌یابد. اما باگذشت زمان و کاهش غلظت آلاینده‌ها تنفس برانگیخته و جمعیت میکروبی نیز کاهش یافته است. رجایی و همکاران (۱۳۹۱) گزارش دادند در خاک‌آلوده به نفت، کمیت کربن عامل محدودکننده فعالیت هتروتروفي خاک نیست بلکه جمعیت فعال یا میزان دسترسی به کربن آلی یعنی کیفیت سوسترا مهم‌ترین عامل به شمار می‌آید. نوروزپور و همکاران (۱۴۰۲) در به‌کارگیری روش‌های مختلف زیست‌پالایی جهت حذف نفتا سنگین، در مطالعه خود عنوان داشتند که میزان تنفس برانگیخته در خاک‌آلوده بیشتر از خاک شاهد بود و از میان روش‌های زیست‌پالایی استفاده‌شده، تلقیح کنسرسیوم باکتریایی و کاربرد کود گاوی بیشترین اثر افزایشی را نسبت به سایر تیمارها در تنفس برانگیخته داشت.

فهرست منابع

۱. افشارنیا، م. ۱۳۹۷. بکارگیری روش‌های مختلف برای زیست‌پالایی مواد نفتی در مکان‌های آلوده پالایشگاه تبریز، پایان‌نامه دکتری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.
۲. افشارنیا، م.، م. ر. ساریخانی، و م. زارعی. ۱۴۰۱. جداسازی باکتریهای تجزیه‌کننده نفت از خاک‌های آلوده پالایشگاه و پتروشیمی تبریز و شناسایی باکتری‌های کارآمد. نشریه دانش آب و خاک. ۳۲(۴): ۹۳-۱۰۶.
۳. جعفری، م.، س. ابراهیمی، و ع. موحدی نائینی. ۱۳۹۲. زیست‌پالایی خاک‌های آلوده به نفت کوره تحت تأثیر همزمان کمپوست زیاله شهری و برخی کودهای شیمیایی. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۳: ۴۳-۵۶.

۴. رجایی، س.، ف. رئیسی.، و س.م. سیدی. ۱۳۹۱. زیست‌پالایی خاک آلوده به نفت خام مسن به روش‌های افزایش بیولوژیک و گیاه‌پالایی. نشریه آب و خاک (علوم و منابع کشاورزی). ۲۶(۴): ۹۰۸-۹۲۱.
۵. شریفی حسینی، س.، ع. شهبازی.، ع.ال. یزدی‌پور.، و ا. کامران‌فر. ۱۳۸۸. پالایش زیستی خاک‌های آلوده به نفت خام با کودشیمیایی. نشریه آب و خاک (علوم و منابع کشاورزی). ۲۳(۳): ۱۴۵-۱۵۵.
۶. طلائى، ا.، ن. ا. جعفرزاده.، م. ر. طلائى.، م. بهشتی. ۱۳۸۹. تجزیه ترکیبات آروماتیک موجود در نفت خام توسط میکروارگانيسم‌های جداشده از محیط. مجله علمی پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی زنجان ۷۰ (۱۸): ۶۸-۸۰.
۷. مینایی تهرانی، د.، ع. حرفت منش.، و ف. آذری دهکردی. ۱۳۸۴. مطالعه تجزیه زیستی نفت خام سنگین در خاک با مقیاس پایلوت. فصل نامه علوم محیطی. ۱۰(۳): ۷۱-۸۲.
۸. نوروزپور، م.، م.ر. ساریخانی.، و ن. علی‌اصغرزاد. ۱۴۰۲. پایش تغییرات تنفسی خاک لوم‌شنی آلوده به نفتای سنگین در تیمارهای مختلف زیست‌پالایی. نشریه دانش آب و خاک. ۳۳(۲): ۵۳-۷۲.
۹. ور ناصری قندعلی، م.، ع. معزی.، و ن. عنایتی ضمیر. ۱۳۹۴. مقایسه روش‌های زیستی و شیمیایی در پالایش یک خاک آلوده به نفت خام. مهندسی زراعی. ۳۸(۲): ۱۱۲-۱۲۴.
10. Anderson, T., and K.H. Domsch. 1985. Maintenance carbon requirements of actively-metabolizing microbial populations under in situ conditions. *Soil Biology and Biochemistry* 17:197-203.
11. ARamsay, M., P.J. Swannell., W.A.Sh. Duke., and T.R. Hill. 2000. Effect of bioremediation on the microbial community in oiled mangrove sediments. *Marine Pollution Bulletin* vol. 7(41):413-419.
12. Chander., K., S. Goya., and K. Kapoor. 2006. Microbial biomass dynamics during the decomposition of leaf litter of Poplar and eucalyptus in a sandy loam. *Appl. Soil Ecol. J.* 35: 10-23.
13. Dashti., N., N. Ali1., M. Eliyas., M. Khanafer., N.A. Sorkhoh., and S. Samir., Radwan. 2015. Most Hydrocarbonoclastic Bacteria in the Total Environment are Diazotrophic, which Highlights Their Value in the Bioremediation of Hydrocarbon Contaminants. *Microbes Environ. Vol.* 30, No. 1: 70-75.
14. Ebrahimi, M., Sarikhani, M.R., Safari Sinegani, A.A., Ahmadi, A., and S., Keesstra. 2019. Estimating the soil respiration under different land uses using artificial neural network and linear regression models. *Catena.* 174: 371-382
15. Gogoi, B.K., N.N Dutta., P. Goswami., and T.R. Krishna Mohan. 2003. A case study of bioremediation of petroleumhydrocarbon contaminated soil at a crude oil spill site. *Advances in Environmental Research*, 7: 767-782.
16. Gomez, F., and M. Sartaj. 2014. Optimization of field scale biopiles for bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil at low temperature conditions by response surface methodology (RSM). *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 89, 103-109.
17. Haritash, A.K., and C.P. Kaushik. 2009. Biodegradation aspects of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): a review. *Journal of hazardous materials*, 169(3):1-15.
18. Kauppi., S., A. Sinkkonen., and M. Romantschuk. 2011. Enhancing bioremediation diesel fuel contaminated soil in a boreal climate: comparison of biostimulation and bioaugmentation. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 65:359-368.
19. Kim., S.J., D.H. Choi., D.S. Sim., and Y.S. Oh. 2005. Evaluation of bioremediation effctiveness on crude oilcontaminated sand. *Chemosphere*, 59:845-852.

20. Lai., C.C., Y.C. Huang., Y.H. Wei., and J.S. Chang. 2009. Biosurfactant-enhanced removal of total petroleum hydrocarbons from contaminated soil, *J. Hazard Mater.* Vol. 167, No. 1, pp. 607-614.
21. Maila., M.P., and T.E. Cloete. 2005. The use of biological activities to monitor the removal of fuel contaminants perspectives to monitoring hydrocarbon contamination: a review. *Int. Biodeterior. Biodegrad*, 55: 1–8.
22. Margesin., R. 2000. Potential of cold-adapted microorganisms for bioremediation of oil-polluted Alpine soils. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 46:3-10.
23. Masciandaro., G., C. Macci., E. Peruzzi., B. Ceccanti., and S. Doni. 2013. Organic matter–microorganism–plant in soil bioremediation: a synergic approach *Rev Environ Sci Biotechnol*, 12:399–419.
24. Miao- dong., W., L. Wei., S. Yao., W. Da- hui. 2006. Effects of surfactant on biodesulfurization by *Corynebacterium* sp. Zd-1 in the presence of organic phase. *Zhejiang University Science*.7: 371- 75.
25. Mnif., I., S. Mnif., R. Sahnoun., S. Maktouf., Y. Ayedi., S. Ellouze-Chaabouni., and D. Ghribi. 2015. Biodegradation of diesel oil by a novel microbial consortium: comparison between co-inoculation with biosurfactant-producing strain and exogenously added biosurfactants, *Sci. Pollut. Res.* 22(19): 14852-14861.
26. Mortazavi., B., A. Horel., M.J. Beazleya., and P.A. Sobecky. 2013. Intrinsic rates of petroleum hydrocarbon biodegradation in Gulf of Mexico intertidal sandy sediments and its enhancement by organic substrates. *Journal of Hazardous Materials*. 244–245: 537–544.
27. Peng., RH., A.S. Xiong., Y. Xeo., X.Y. Fu., F. Gao., W. Zhao., Y.S. Tian., and Q.H. Yao. 2008. Microbial biodegradation of polyaromatic hydrocarbons: a review. *FEMS Microbiol. Rev*, 32: 927–955.
28. Ramadass., K., M. Megharaj., K. Venkateswarlu., R. Naidu. 2015. Ecological implications of motor oil pollution: earthworm survival and soil health. *Soil Biol.Biochem*. 85: 72-81.
29. Souza EC, Vessoni-Penna TC and de Souza Oliveira RP, 2014. Biosurfactant-enhanced hydrocarbon bioremediation:An overview,” *Int. Biodeter Biodegr*. 89(1):88-94.
30. Walworth., J.L., and C.M. Reynolds. 1995. Bioremediation of a petroleum-contaminated cryic soil: effects of phosphorous, nitrogen, and temperature. *Journal of Soil Contam*, 4:299-310.
31. Wu., M.A., W. Dick., W.Li., X. Wang., Q.Yang., T. Wang., L. Xu., M. Zhang., and L. Chen. 2016. Bioaugmentation and biostimulation of hydrocarbon degradation and the microbial community in a petroleum-contaminated soil, China, *Biodegradation*, 107: 158–164.
32. Wu., M.L., L.M. Chen., Y.Q. Tian., D. Yi., andW.A. Dick. 2013. Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by microbial consortia enriched from three soils using two different culture media. *Environ. Pollut*, 178: 152-158.
33. Zhao., D., C. Liu., L. Liu., Y. Zhang., Q. Liu., W. Wu. 2011. Selection of functional consortium for crude oil-contaminated soil remediation, China, *Biodegradation*. 65:1244-1248.

Monitoring Respiration Changes in a Light Naphtha-Contaminated Sandy Loam Soil under Different Bioremediation Treatments

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

MSc Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz ; E-mail:
zakieh.afiati1994@gmail.com

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

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

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

Received: June 26, 2023 and Accepted: January 10, 2024

Abstract

Petroleum hydrocarbons are one of the most common groups of organic pollutants in the environment. Bioremediation of soils contaminated with petroleum compounds is an effective process for cleaning petroleum pollutants in the environment. In the present research, to reduce light naphtha (1%) pollutant in a sandy loam soil, different bioremediation methods including biostimulation, bioaugmentation, and integrated treatment (including both bioaugmentation and biostimulation) were used. This experiment was done as a split-plot design with three factors (pollution, bioremediation, and time) with 3 repetitions in 3 kg pots. After running the experiment at time intervals of 0, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90 and 120 days, samples were taken from the test pots and parameters including basal respiration (BR) and substrate-induced respiration (SIR) were measured. The results showed that application of bioremediation treatments had reduced light naphtha pollution. Also, petroleum pollution had affected the activity of soil microorganisms, such that the maximum amount of BR and SIR was obtained in the early days; but with the passing of time, BR had a sharper drop compared to SIR. Seemingly, the microbial community responded to added glucose as a simple and available carbon source, and SIR was less reduced, but, probably, basal respiration encountered lack of carbon sources and decreased more. The results showed that, among the bioremediation treatments, integrated treatment had a greater effect on the reduction of petroleum hydrocarbons than other bioremediation treatments at the probability level of ($P < 0.01$). The use of integrated treatment, in addition to increasing the active microbial population involved in the decomposition of petroleum compounds and providing optimal conditions for their activity, stimulates the indigenous soil microbial population and is a suitable method for removing petroleum compounds.

Keywords: Basal respiration, Bioaugmentation, Biostimulation, Substrate-induced respiration.

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

Evaluation of Scoring and Weighting Methods for Soil Characteristics to Determine Soil Quality in Different Land Uses

F. Samie Khoshkestalkhi, N. Yaghmaeian*, S. Abrishamkesh, and A. Maslahatjou

PhD student, Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Iran;

E-mail: fatemehsamie727@gmail.com

Associated Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Iran;

E-mail: yaghmaeian_na@guilan.ac.ir

Assistant Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Iran;

E-mail: sabrishamkesh@guilan.ac.ir

MSc., General Office of Natural Resources and Watershed Management of Guilan Province, Rasht, Iran.

Received: April 8, 2023 and Accepted: January 2, 2024

Abstract

Forests have important role for ecosystem maintenance, and deforestation is one of the factors in degradation of soil quality. In this study, using multivariate analysis, soil quality index was evaluated in three land uses including forest, grassland, and cropland at two depths of 0-10 and 10-20 cm in Sidasht of Guilan Province, Iran. The weighted additive soil quality was calculated using two methods: (1) Minimum data set (MDS₁) and (2) Revised minimum data set (MDS₂). Also, each feature's variance and communality and two scoring methods, namely, linear and non-linear, were compared and evaluated. In MDS₂, the effects of land use on soil quality index (SQI) indicated that the mean values calculated by the non-linear scoring method was significantly more precise than the linear one. Soil quality indices in forest and grassland had the maximum values when compared to cropland. SQI_{W2-MDS2-NLS} had the highest sensitivity index (SI= 3.14). In MDS₂, the soil properties including silt, Mean Weight Diameter, pH, CaCO₃ and available phosphorus were selected. Efficiency ratio of MDS₂ was 80% and in soil quality assessment, MDS₂ had higher efficiency than MDS₁. Soil condition and change of soil management practices were reflected in MDS₂ more clearly than in MDS₁. Accordingly, SQI_{W2-MDS2-NLS} method was the best means for evaluating the effects of deforestation on soil quality in the studied area.

Keywords: Soil quality index, Land use change, Revised minimum data set, Deforestation

* Corresponding author's email: yaghmaeian_na@guilan.ac.ir

Performance Evaluation of Satellite Images and Spectral Indices in Estimating Soil Moisture in Telo Region, Tehran Province

M. Miri*, A.A. Noroozi, A. Abdeh Kolahchi, and J. Porhemmat

Assist. Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

Morteza.miri64@gmail.com

Professor. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

noroozi.aa@gmail.com

Assist. Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

nabi.kolahchi@gmail.com

Professor. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

porhemmat@scwmri.ac.ir

Received: November 18, 2023 and Accepted: March 11, 2024

Abstract

Measuring the moisture content of surface soil, as one of the most important components of the water cycle, plays a significant role in the optimal management of water and soil resources. The aim of this research was to evaluate the accuracy of spectral indices and Sentinel-2 satellite images for estimating soil moisture during the period of 2020-2022 in the Telo region, Tehran Province, Iran. The data used included the daily Sentinel-2 images, 30-Meters Digital Height Model and field measurements using the TDR. The spectral indices used in this study included NDWI, MNDWI, NDVI, NDMI, and SAVI. Analysis of the amount of surface soil moisture recorded showed that the average soil moisture in the area was 14.07%. In terms of time, the maximum amount of soil moisture with a value of 40% was recorded on December 18, 2020, and the minimum value was recorded with a value of 1.3% in early June, 2021. Analysis of the trend of soil moisture values showed that the minimum soil moisture values were recorded in the warm season due to the increase in temperature and evaporation and the decrease in precipitation, while the maximum soil moisture was recorded in the cold season with the beginning of the rainy season in the region and the decrease in temperature. Investigating the relationship between soil moisture values recorded using TDR and spectral indices calculated on Sentinel-2 images showed that there was no clear and significant relationship between NDVI and SAVI indices with TDR soil moisture values; and the maximum correlation was obtained for NDWI indexes with a correlation value of 0.23, NDMI with a value of 0.35 and MNDWI index with a correlation value of 0.59.

Keywords; TDR, Sentinel-2 images, MNDWI, Soil water content.

* Corresponding author's email: Morteza.miri64@gmail.com

Investigating Some Chemical, Morphological Characteristics and Contamination Risk Assessment of Heavy Metals in Sewage Sludge and Its Biochar at Different Temperatures

F. Khaefi*, A.R. Hosseinpour, and H. Motaghian

Soil Sci. Dept. Shahrekord University, Shahrekord, Iran. khaefif@yahoo.com

Prof. Soil Sci. Dept. Shahrekord University, Shahrekord, Iran. hosseinpour-a@sku.ac.ir

Soil Sci. Dept. Shahrekord University, Shahrekord, Iran. motaghian.h@yahoo.com

Received: February 20, 2023 and Accepted: March 11, 2024

Abstract

Pyrolysis is important as an economical and environmentally friendly technology to facilitate recycling and reduce the environmental risk of sewage sludge. The aim of this research was to study changes in the structure, specific surface area, and pores of biochar, and to evaluate the risk of heavy metals contamination due to pyrolysis of sewage sludge. Sewage sludge biochar was prepared under limited oxygen conditions at temperatures of 300, 400, 500, 600 and 700 °C. Specific surface area and pore analysis were determined using the N₂ adsorption isotherm, BET equation, and scanning electron microscopy (SEM) images. The risk of lead and zinc contamination was assessed using the BCR fractionation method and contamination factors. The results showed that the specific surface of biochar under the influence of temperatures of 400, 500, 600 and 700 °C was 2.65, 3.65, 8.38, and 5.57 times that of sludge, respectively. By comparing the total volume and the average pore diameter, biochar had more porosity than sewage sludge. The main pores in the biochar were meso (8.34-19.98 nm). The morphological structure of the sewage sludge was smooth and irregular, and, in contrast to the biochars, they had more porous and uneven surface. The presence of honeycomb-shaped structures was detectable at high temperatures, especially at 600 °C. The toxic response factor (E_r) for sewage sludge and biochar was low. By converting the sewage sludge to biochar, the contamination factor (C_f) of Zn and Pb was reduced by more than 50%. The conversion of sewage sludge to biochar increased the specific surface, increased porosity, and stabilized carbon in the form of aromatic compounds. Due to the reduction of metal contamination factor and the possibility of environmental risk in biochar, these materials can be used as adsorbents or modifiers in different environments.

Keywords: Environmental hazard, Pb and Zn contamination, Pyrolysis temperature, Specific surface

* Corresponding author's email: khaefif@yahoo.com

Meta-Analysis on Research Results of the Effect of Manure, Biological and Nitrogen Fertilizers on Sugar Beet Quantitative and Qualitative Traits

S. Khayamim*, H. Noshad, B. Babaei, A. Rajabi, and S. Khodadadi

Assistant Prof of Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran, samar.khayam@gmail.com

Assistant Prof of Sugar Beet Seed Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran, hamidnoshad@yahoo.com

Assistant Prof of Sugar Beet Seed Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran, babak_babaei@yahoo.com

Prof of Sugar Beet Seed Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran, abazar.rajabi@yahoo.com

Researcher of Sugar Beet Seed Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran, kh.agronomist@yahoo.com

Received: November 7, 2023 and Accepted: March 11, 2024

Abstract

The quantity and quality of sugar beet root impurities, especially sodium, is one of the factors affecting root quality and extraction coefficient of sugar (ECS) from sugar beet. Various factors such as soil conditions, application time, and quantity of different fertilizers have effects on the amount of sugar that can be extracted in the factory. Data and results obtained from researches conducted during 1997-2021, which were published in 30 final reports in Sugar Beet Seed Institute (SBSI), were analyzed in order to investigate the factors that affected sugar beet impurities and its quantitative and qualitative traits. The data of these reports were created in a database containing 480 rows and 26 columns. The data corresponding to the investigated treatments included manure, bacterial products and amino acids, and time and amount of nitrogen application were extracted from the database. Then, the reaction ratio (the ratio of trait changes in each treatment to the control in the same experiment), average of the reaction ratio, standard deviation, and the significant effects of the contribution of each factor to sugar beet root traits were determined. The results of the meta-analysis studies showed that consumption of 60 t/ha of manure, 150-200 kg/ha nitrogen, and the split application of 25% of N-fertilizer before planting, 50% during thinning, and 25% during the second thinning, increased root, sugar, and white sugar yields significantly, while sodium content in sugar beet roots did not change significantly. Excessive use of nitrogen (i.e. 250-300 kg/ha) and use of all nitrogen fertilizer after planting increased root sodium content by, respectively, 18% and 7.5%, while reducing yield. The bacterial product and amino acid only increased the sugar content by about one percent.

Keywords: Split application of fertilizer, Nitrogen fertilizer, Organic fertilizer, Root sodium content, White sugar yield.

* Corresponding author's email: samar.khayam@gmail.com

Land Suitability Evaluation and Assessing Limitations for Industrial Plants Cultivation in Irrigated Plains of Iran

M.N. Navidi* and J. Seyedmohammadi

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

Assistant Prof., Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran; j.mohammadi@areeo.ac.ir

Received: July 2, 2023, and Accepted: January 2, 2024

Abstract

The soil units in the irrigated plains across the country were identified based on previous soil studies, satellite images, land use maps, and agricultural-climatic zones. The purpose was to determine the land potential for irrigated cultivation of industrial crops such as sugar beet, cotton, safflower, and sugarcane. Then, the FAO framework and the square root parametric method were used to evaluate the land suitability for irrigated cultivation of these crops. The survey results revealed the land suitability classes for four crops under irrigated cultivation: sugar beet, cotton, safflower, and sugarcane. For sugar beet, out of 4 million hectares (Mha) of surveyed land, 1.23 Mha were in class S1 (highly suitable), 1.5 Mha in S2 (moderately suitable), 740 thousand hectares (Tha) in S3 (marginally suitable), 390 Tha in N1 (currently suitable), and 420 Tha in class N2 (permanently suitable). For cotton, out of 2.4 Mha of surveyed land, 75 Tha were in class S1, 671 Tha in S2, 895 Tha in S3, 420 Tha in N1, and 340 Tha in N2. For safflower, out of 2.2 Mha of surveyed land, 38 Tha were in class S1, 56 Tha in S2, 1.3 Mha in S3, 363 Tha in N1, and 398 Tha in N2. For sugarcane, out of 615 Tha of surveyed land, 6 Tha were in class S1, 18 Tha in class S2, 193 Tha in class S3, 98 Tha in class N1, and 300 Tha in class N2. The data was statistically analysed and the results indicated that the the land suitability classes were classified with resonable accuracy. The following factors were the main limiting characteristics that limited cultivation of the four crops under irrigation: For sugar beet: soil pH, salinity, alkalinity, and drainage; for cotton: climate, slope, salinity, alkalinity, lime and gypsum; for safflower: pH, drainage, salinity, alkalinity and climate; and for sugarcane: salinity, alkalinity, drainage and slope. Due attention to the prepared land suitability maps of the aforementioned crops would facilitate cultivation management for farmers and planners.

Keywords: Land suitability classes, Land suitability for industrial crops, Land limitations for agriculture

*Corresponding author's email: n.navidi@areeo.ac.ir

Contents

Subject

Page

Land Suitability Evaluation and Assessing Limitations for Industrial Plants Cultivation in Irrigated Plains of Iran.....	19
M.N. Navidi and J. Seyedmohammadi	

Meta-Analysis on Research Results of the Effect of Manure, Biological and Nitrogen Fertilizers on Sugar Beet Quantitative and Qualitative Traits.....	20
S. Khayamim, H. Noshad, B. Babae, A. Rajabi, and S. Khodadadi	

Investigating Some Chemical, Morphological Characteristics and Contamination Risk Assessment of Heavy Metals in Sewage Sludge and Its Biochar at Different Temperatures...	21
F. Khaefi, A.R. Hosseinpur, and H. Motaghian	

Performance Evaluation of Satellite Images and Spectral Indices in Estimating Soil Moisture in Telo Region, Tehran Province.....	22
M. Miri, A.A. Noroozi, A. Abdeh Kolahchi, and J. Porhemmat	

Evaluation of Scoring and Weighting Methods for Soil Characteristics to Determine Soil Quality in Different Land Uses.....	23
F. Samie Khoshkestalkhi, N. Yaghmaeian, S. Abrishamkesh, and A. Maslahatjou	

Monitoring Respiration Changes in a Light Naphtha-Contaminated Sandy Loam Soil under Differe.....	24
Z. Afiat, M. Norozpoor, M.R. Sarikhani and N. Aliasgharzad	

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

Soil and Water Research Institute Soil Science Society of Iran

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

**Vol. 37, No. 4
2024**

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

Editorial Board

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

English Editor:	Hamid Siadat, PhD
Type and design:	Kiana Khomehchi

Address: P. O. Box: 31785-311, Karaj – IRAN

Tel / Fax: 026-36208796

Soil and Water Institute Website: www.swri.ir

Journal Website: www.srjournal.areeo.ir



Soil and Water Research Institute



Soil Science Society of Iran

Iranian Journal of Soil Research

(Soil and Water Sciences)

Volume 37 \ No. 4 \ 2024

ISSN: 2228 -7124

Subject	<u>Contents</u>	Page
Land Suitability Evaluation and Assessing Limitations for Industrial Plants Cultivation in Irrigated Plains of Iran.....		19
M.N. Navidi and J. Seyedmohammadi		
Meta-Analysis on Research Results of the Effect of Manure, Biological and Nitrogen Fertilizers on Sugar Beet Quantitative and Qualitative Traits.....		20
S. Khayamim, H. Noshad, B. Babaei, A. Rajabi, and S. Khodadadi		
Investigating Some Chemical, Morphological Characteristics and Contamination Risk Assessment of Heavy Metals in Sewage Sludge and Its Biochar at Different Temperatures....		21
F. Khaefi, A.R. Hosseinpour, and H. Motaghian		
Performance Evaluation of Satellite Images and Spectral Indices in Estimating Soil Moisture in Telo Region, Tehran Province.....		22
M. Miri, A.A. Noroozi, A. Abdeh Kolahchi, and J. Porhemmat		
Evaluation of Scoring and Weighting Methods for Soil Characteristics to Determine Soil Quality in Different Land Uses.....		23
F. Samie Khoshkestalkhi, N. Yaghmaeian, S. Abrishamkesh, and A. Maslahatjou		
Monitoring Respiration Changes in a Light Naphtha-Contaminated Sandy Loam Soil under Differe.....		24
Z. Afiat, M. Norozpoor, M.R. Sarikhani and N. Aliasgharzad		