



انجمن علوم خاک ایران



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 ۴۰ / شماره ۱ سال ۱۴۰۵

فهرست مقالات

- ۱.....مدل‌سازی مکانی و پیش‌بینی شاخص حاصلخیزی خاک در دو منطقه خشک و نیمه‌خشک استان ایلام
اصغر رحمانی، محمود رستمی نیا، نسیمه صیدی و سید روح اله موسوی
- ۲۳.....روند تغییرات نیتروژن و تأثیر اسیدهای آمینه در گلدهی و تشکیل میوه مرکبات
علی اسدی کنگرشاهی و نگین اخلاقی امیری
- ۴۵.....تأثیر پوشش‌دار کردن بذر با محرک‌های زیستی بر عملکرد و اجزای عملکرد کلزا (*Brassica napus L.*)
پارسا سکوتی، سلیم فرزانه، عبدالقیوم قلی پوری، شهرام خدادادی، بهمن خوشرو و نگین تلسچیان تبریزی
- ۶۱.....تحلیل چندمعیاره اثر محرک‌های آلی رشد بر کاهش خسارت ناشی از تنش خشکی در چغندر قند
رضا محمدی کیا، محمد پسندیده، فرحناز حمدی هولاسو و ولی اله یوسف آبادی
- جنبه‌های مختلف تحلیل، تفسیر و تشخیص وضعیت عناصر غذایی با روش‌های PCA، CND-clr و CND-itr (مطالعه موردی چغندر قند)
عبدالمحمد دریاشناس، کریم شهبازی و کامبیز بازرگان
- تأثیر قدرت تفکیک مکانی متغیرهای محیطی بر دقت نقشه‌برداری رقومی خاک: مروری بر اساس مدل مفهومی
رسول خوارزمی و محسن باقری بداغ آبادی
- ۱۰۵.....SCORPAN

وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

انجمن علوم خاک ایران

مؤسسه تحقیقات خاک و آب

نشریه
پژوهش‌های خاک

جلد ۴۰ شماره (۱)

۱۴۰۵

صاحب امتیاز: مؤسسه تحقیقات خاک و آب

تأییدیه درجه علمی

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

استاد مؤسسه تحقیقات خاک و آب

مدیر مسئول: دکتر هادی اسدی رحمانی

استاد مؤسسه تحقیقات خاک و آب

سر دبیر: دکتر کریم شهبازی

اعضاء هیأت تحریریه (به ترتیب حروف الفبا):

مدرس دانشگاه

دکتر محمد بای بوردی

استاد مؤسسه تحقیقات خاک و آب

دکتر حسین بشارتی

استادیار مؤسسه تحقیقات خاک و آب

دکتر محمدرضا بلالی

دانشیار مؤسسه تحقیقات خاک و آب

دکتر کامبیز بازرگان

دانشیار دانشگاه تهران

دکتر حسن توفیقی

استاد دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر غلامحسین حق نیا

استاد مؤسسه تحقیقات خاک و آب

دکتر کاظم خاوازی

دانشیار پژوهش سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی

دکتر محمدحسن روزیطلب

استاد پژوهش مؤسسه تحقیقات خاک و آب

دکتر حمید سیادت

استاد دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر امیر فتوت

استاد دانشگاه تهران

دکتر منوچهر گرجی

دانشیار مؤسسه تحقیقات خاک و آب

دکتر عزیز مؤمنی

استاد دانشگاه تبریز

دکتر محمدرضا نیشابوری

دکتر حمید سیادت

ویراستار انگلیسی:

مهندس کیانا خامه‌چی

ویراستار فنی:

چهار شماره

تعداد انتشار در سال:

این نشریه در پایگاه‌های علمی زیر نمایه می‌شود:

www.srjournal.areeo.ir :

www.isc.gov.ir

پایگاه استنادی علوم جهان اسلام (ISC):

پایگاه الکترونیکی نشریه پژوهش‌های خاک

www.swri.ir

پایگاه الکترونیکی مؤسسه تحقیقات خاک و آب:

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

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

www.sid.ir

پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی:

majalehsoil@yahoo.com

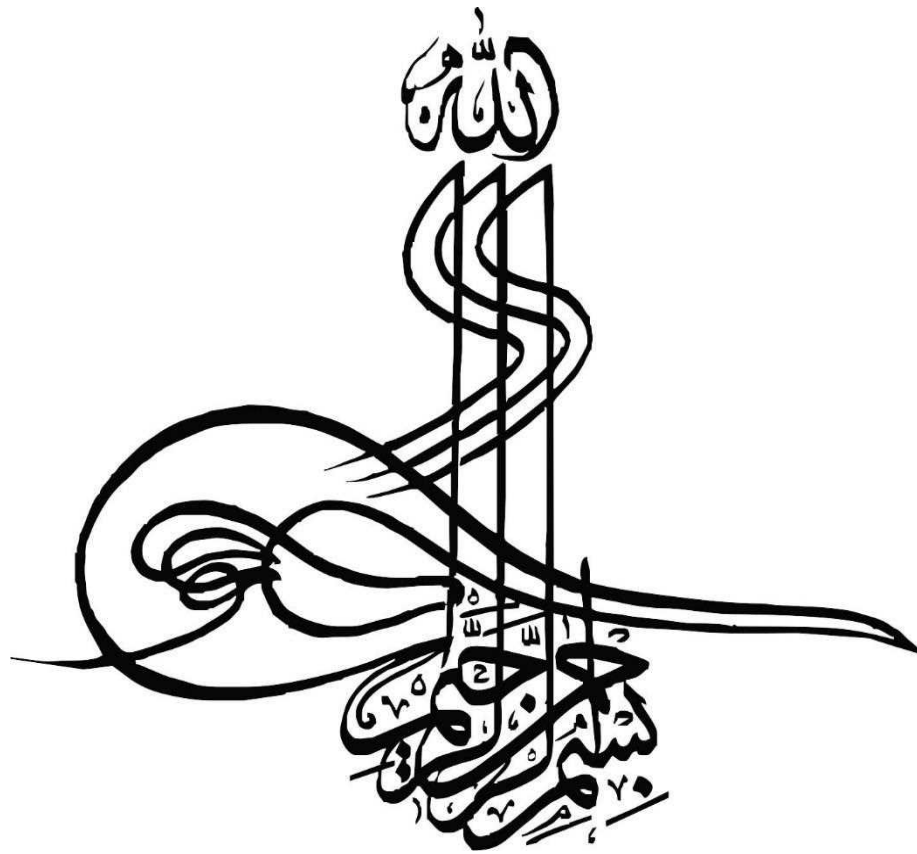
آدرس الکترونیکی دفتر مجله:

www.civilica

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

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

تلفن و نمابر: ۳۶۲۰۸۷۹۶ (۰۲۶)



فهرست مقالات

- ۱.....مدل سازی مکانی و پیش بینی شاخص حاصلخیزی خاک در دو منطقه خشک و نیمه خشک استان ایلام.....
اصغر رحمانی، محمود رستمی نیا، نسیمه صیدی و سید روح اله موسوی
- ۲۳..... روند تغییرات نیتروژن و تأثیر اسیدهای آمینه در گلدهی و تشکیل میوه مرکبات.....
علی اسدی کنگرشاهی و نگین اخلاقی امیری
- ۴۵..... تأثیر پوشش دار کردن بذر با محرک های زیستی بر عملکرد و اجزای عملکرد کلزا (*Brassica napus L.*).....
پارسا سکوتی، سلیم فرزانه، عبدالقیوم قلی پوری، شهرام خدادادی، بهمن خوشرو و نگین تلسچیان تبریزی
- ۶۱..... تحلیل چندمعیاره اثر محرک های آلی رشد بر کاهش خسارت ناشی از تنش خشکی در چغندر قند.....
رضا محمدی کیا، محمد پسندیده، فرحناز حمدی هولاسو و ولی اله یوسف آبادی
- جنبه های مختلف تحلیل، تفسیر و تشخیص وضعیت عناصر غذایی با روش های PCA، CND-clr و CND-ilor (مطالعه موردی
چغندر قند).....
عبدالمحمد دریاشناس، کریم شهبازی و کامبیز بازرگان
- تأثیر قدرت تفکیک مکانی متغیرهای محیطی بر دقت نقشه برداری رقومی خاک: مروری بر اساس مدل مفهومی
SCORPAN.....
رسول خوارزمی و محسن باقری بداغ آبادی

«راهنمای تهیه مقاله برای انتشار در نشریه علمی پژوهش‌های خاک»

اهداف و دامنه فعالیت نشریه

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

انواع دست‌نوشته‌ها و محدودیت‌ها

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

اصول کلی ارسال مقاله

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

۱. محتوای مقاله پیش‌تر در هیچ نشریه‌ای (به زبان فارسی یا سایر زبان‌ها) منتشر نشده و به طور هم‌زمان برای بررسی به مجله یا ناشر دیگری ارسال نشده است.
۲. تمامی نویسندگان مقاله و در صورت لزوم مقامات مسئول در مؤسسه یا سازمان محل انجام پژوهش، به صورت رسمی یا ضمنی انتشار مقاله را تأیید کرده‌اند.
۳. نویسنده مسئول تضمین می‌کند که تمامی اطلاعات ارائه شده صحیح بوده و رعایت اصول اخلاق پژوهش در تهیه و نگارش مقاله انجام شده است.
۴. دفتر نشریه و ناشر هیچ‌گونه مسئولیتی در قبال دعاوی احتمالی ناشی از محتوای مقاله بر عهده نخواهند داشت. در صورت احراز مغایرت با اصول فوق، مقاله در هر مرحله از فرایند انتشار و حتی پس از انتشار، از نشریه بازپس‌گیری (Retracted) خواهد شد.
۵. مقاله باید به زبان فارسی روان و پیراسته از غلط‌های نگارشی و نوشتاری باشد. از آوردن واژه‌های بیگانه که معادل شناخته شده فارسی دارند، جداً خودداری گردد.
۶. مسئولیت صحت و سقم مطالب، نظرات و عقاید مندرج در مقالات به عهده نویسندگان مقاله می‌باشد. حقوق معنوی مقالات برای نویسندگان محفوظ می‌باشد.
۷. مقالاتی که مبنی بر آزمایش‌هایی است که بیش از ۳ سال از خاتمه اجرای آن گذشته است از شانس کمتری برای پذیرش برخوردار خواهند بود و نویسندگان باید علت تأخیر در نوشتن مقاله را توجیه کنند.

نسخه‌های ارسالی به دفتر نشریه

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

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

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

تعداد صفحات مقاله

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

واژه‌های خارجی در متن فارسی

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

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

زیرنویس‌ها

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

۱. زیرنویس‌های فارسی باید به‌صورت **راست‌چین** و زیرنویس‌های لاتین به‌صورت **چپ‌چین** نوشته شوند.
۲. در ابتدای هر زیرنویس، شماره مربوطه درج شده و سپس یک نقطه (.) و یک فاصله قرار گیرد؛ پس از آن متن زیرنویس تایپ شود.
۳. فونت و اندازه زیرنویس‌ها به شرح زیر است:
 - ✓ زیرنویس فارسی: B, Nazanin, اندازه ۱۰
 - ✓ زیرنویس انگلیسی: Times New Roman, اندازه ۹
۴. شماره‌گذاری زیرنویس‌ها باید به‌صورت پیوسته در کل مقاله انجام شود و از تکرار شماره‌گذاری مجزا در صفحات مختلف خودداری گردد.

۵. استفاده از زیرنویس باید به حداقل و فقط در موارد ضروری مانند توضیح واژه‌های تخصصی، ارائه معادل لاتین یا توضیحات تکمیلی محدود شود.

معرفی نشانه و متغیرها در متن

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

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

فرمت کلی و ساختار مقاله

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

صفحه عنوان مقاله و اطلاعات مؤلفان

عنوان مقاله باید روان، گویا، مختصر و منعکس‌کننده محتوای تحقیق باشد و در عین حال از واژگان کلیدی مقاله متمایز باشد. در زیر عنوان، نام و نام خانوادگی نویسندگان به همراه وابستگی سازمانی و پست الکترونیک آن‌ها درج می‌شود. لازم است نویسنده مسئول (Corresponding Author) مشخص شود و اطلاعات کامل شامل وابستگی سازمانی، ایمیل و آدرس پستی دقیق ارائه گردد. برای یکپارچگی فرمت، عنوان مقاله با قلم B Nazanin، اندازه ۱۴، Bold، نام مؤلفان با قلم B Nazanin، اندازه ۱۲، Bold، آدرس‌ها با قلم B Nazanin، اندازه ۱۱ و ایمیل‌ها با قلم Times New Roman، سایز ۹ و به رنگ آبی نوشته شود. خلاصه‌ای از نوع و اندازه قلم برای هر بخش از مقاله در جدول ۳ ارائه شده است.

چکیده و کلیدواژه‌ها

چکیده‌ها

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

چکیده فارسی

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

چکیده انگلیسی

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

- Objectives
- Methodology
- Results
- Conclusion

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

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

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

واژگان کلیدی (Keywords)

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

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

مقدمه

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

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

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

مواد و روش‌ها

در این بخش باید شرح کامل، دقیق و جزئیات مربوط به مواد و روش‌های مورد استفاده در پژوهش ارائه شود. این توضیحات باید به اندازه‌ای شفاف باشند که امکان تکرار پژوهش توسط سایر محققان وجود داشته باشد. اطلاعات این بخش می‌تواند شامل موارد

زیر باشد: جامعه آماری یا منطقه مورد مطالعه، روش‌های نمونه‌گیری، تیمارهای آزمایشی، دستگاه‌ها و مواد مورد استفاده (به همراه مشخصات فنی و نام شرکت سازنده)، روش‌های تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها.

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

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

نتایج

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

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

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

جدول‌ها

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

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

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

فونت و سایز جداول

- عنوان فارسی بالای جدول: B Mitra 11, Bold
 - عنوان لاتین بالای جدول: Times New Roman 9, Bold
 - عنوان ستون‌ها: B Mitra 10, Bold
 - متن فارسی داخل جدول: B Mitra 10
 - متن انگلیسی داخل جدول: Times New Roman 8
- هر جدول باید با یک سطر فاصله از متن قبل و بعد از خود قرار گیرد و اگر از منبعی استفاده شده است، مرجع باید در انتهای عنوان جدول ذکر شود. جدول (۱) نمونه‌ای از یک فرمت قابل قبول است

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

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

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

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

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

شکل‌ها

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

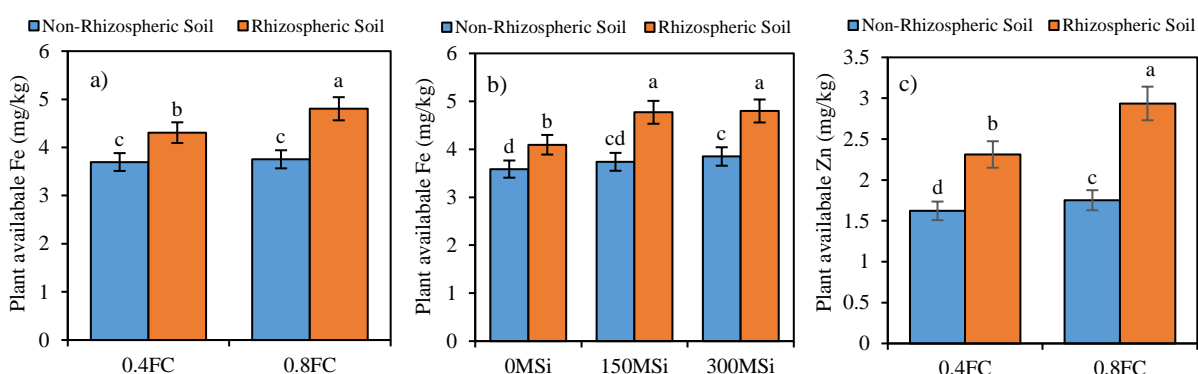
نتایج ارائه شده در جداول یا شکل‌ها نباید به شکل دیگری مانند متن نوشتاری در بخش دیگری از مقاله تکرار شوند. شکل‌ها می‌توانند به صورت رنگی یا سیاه و سفید باشند و باید در محل ارجاع به آن‌ها در متن درج شوند. ذکر واحد کمیت‌ها در شکل‌ها الزامی است و همه شکل‌ها باید در متن به طور دقیق ارجاع داده شوند. در تهیه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

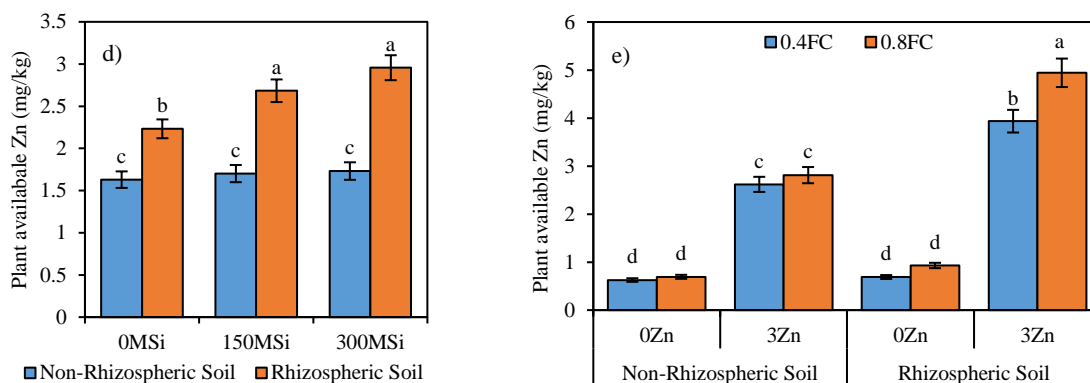
اگر یک شکل شامل چند تصویر یا نمودار است، زیر شکل‌ها باید با حروف a, b, c و ... مشخص شوند و در متن مقاله نیز به همراه شماره شکل به آن‌ها ارجاع داده شود. تمام اختصارات موجود در شکل‌ها باید در زیرنویس و بلافاصله پس از عنوان شکل توضیح داده شوند. تمام اعداد و توضیحات داخل شکل باید به انگلیسی ارائه شوند. عنوان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

فونت و سایز شکل‌ها

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

مثال:





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

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

فرمول‌ها و روابط ریاضی

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

* فونت و سایز فرمول‌ها و روابط ریاضی: (Times New Roman 11)
 دو نمونه رابطه در زیر آمده است.

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

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

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

بحث

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

۱. ارجاع به نتایج خود: به نتایج و مشاهدات تحقیق اشاره شود و از آنها برای پشتیبانی از تحلیل استفاده شود.
۲. استفاده از مکانیسم‌های علمی: یافته‌ها باید با توجه به مکانیسم‌های زیر بنایی موجود و داده‌های مطالعات پیشین تحلیل شوند و دلایل قبول یا رد نتایج با استناد به شواهد علمی توضیح داده شود.

۳. **مقایسه با مطالعات قبلی:** صرفاً بیان موافق یا مخالف بودن با نتایج پیشین کافی نیست؛ نویسنده باید نشان دهد که چرا نتایج مطالعه وی با نتایج دیگران هماهنگ یا متفاوت است و چه مکانیسم یا دلیل علمی مشاهدات آنها را توجیه می‌کند.

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

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

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

نتیجه‌گیری

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

تشکر و قدردانی

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

تعارض منافع

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

منابع و سبک مرجع‌دهی

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

ارجاع در متن

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

• ارجاع در متن به صورت خارج از پرانتز:

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

• ارجاع در متن به صورت داخل پرانتز:

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

ارجاع در فهرست منابع (References)

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

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

جدول ۲- نحوه صحیح ارجاع دهی به منابع در فهرست منابع (به سبک Harvard)

| مدرک | مثال |
|---------------------------------------|--|
| مقاله با ۱ نویسنده | Smith, J.M., 1974. The theory of games and the evolution of animal conflicts. <i>Journal of theoretical biology</i> , 47(1), pp.209-221. https://doi.org/10.1016/0022-5193(74)90110-6 |
| مقاله با ۲ نویسنده | Smith, J.M. and Price, G.R., 1973. The logic of animal conflict. <i>Nature</i> , 246(5427), pp.15-18. https://doi.org/10.1038/246015a0 |
| مقاله با ۳ نویسنده یا بیشتر | Wankmüller, F.J., Delval, L., Lehmann, P., Baur, M.J., Cecere, A., Wolf, S., Or, D., Javaux, M. and Carminati, A., 2024. Global influence of soil texture on ecosystem water limitation. <i>Nature</i> , 635(8039), pp.631-638. https://doi.org/10.1038/s41586-024-08089-2 |
| مقاله فارسی ^۱ با x نویسنده | Karimi, S., 2025. Exploring soil temperature extremes: unraveling dynamics with local and spatial machine learning models. <i>Stochastic Environmental Research and Risk Assessment</i> , pp.1-19. https://doi.org/10.1007/s00477-025-03068-z . (In Persian) |
| | Zaheri Abdehvand, Z., Karimi, D., Rangzan, K. and Mousavi, S.R., 2024. Assessment of soil fertility and nutrient management strategies in calcareous soils of Khuzestan province: A case study using the Nutrient Index Value method. <i>Environmental Monitoring and Assessment</i> , 196(6), p.503. https://doi.org/10.1007/s10661-024-12665-4 . (In Persian) |
| مقاله کنفرانسی | Thompson, R., 2018. Soil moisture variation under drought conditions. Paper presented at the 10th International Soil Science Conference, Berlin, Germany, 5-7 June. |
| پایان‌نامه و رساله دکتری | Rahimi, F., 2017. Phosphorus dynamics in calcareous soils. PhD thesis, University of Tehran, Tehran, Iran. (In Persian) |
| منابع الکترونیک | Soil Survey Staff. 2004. NRCS soils [Online]. Available at http://soils.usda.gov [verified 23 Mar. 2005]. USDA-NRCS, Washington, DC. |
| ارجاع به کتاب | Brady, N.C., Weil, R.R. and Weil, R.R., 2008. <i>The nature and properties of soils</i> (Vol. 13, pp. 662-710). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall. |
| ارجاع به یک فصل از کتاب | Mousavi, S.M. and Sedaghat, A., 2025. Soil Fertility Enhancement Through Biochar Technology. In <i>Biochar Revolution: Transforming Agriculture and Environment Management</i> (pp. 99-115). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-73154-9-6 |
| کتاب چند جلدی | Marschner, P., 2012. <i>Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants</i> . Vol.3. 3rd ed. Press, New York, pp.123-145. |
| ارجاع به استانداردها | ISO, D., 2005. 10390; Soil Quality—Determination of pH (ISO 10390: 2005). <i>DIN Deutsches Institut für Normung eV Beuth-Verlag, Berlin</i> . Available at: xxxxxx |

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

سایر نکات در رابطه با ارجاع‌دهی

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

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

مثال در فهرست منابع

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

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

۱. اگر نام نویسنده در متن ذکر شده باشد، نیازی به تکرار آن در پراکنش نیست و تنها سال انتشار ذکر می‌شود.
مثال: مطابق نتایج ما، Smith و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که (صحیح)
مطابق نتایج ما، Smith et al (2021) نشان دادند که (اشتباه)
۲. مطابق نتایج ما، Smith و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که (Smith et al., 2021) (اشتباه)
۳. حتی اگر منبع اصلی فارسی باشد، باید در متن مقاله به انگلیسی به آن ارجاع داده شود و در فهرست منابع نیز ترجمه انگلیسی همراه با برجسب (*In Persian*) ذکر گردد. **در این مورد ذکر (In Persian) باید بعد از شناسه DOI درج گردد.**
۴. زمانی که یک مطلب به چند منبع مرتبط است، منابع باید با نقطه‌ویرگول (;) از یکدیگر جدا شوند.
۵. **مثال:** (Smith, 2020; Rezai et al., 2019; Karimi, 2018a)
۶. ترتیب منابع در فهرست منابع باید بر اساس حروف الفبای انگلیسی مرتب شود، نه بر اساس ترتیب استناد در متن.
در فهرست منابع نام کتاب و عناوین نشریه‌ها باید به صورت **ایتالیک** نوشته شوند. **علاوه بر این، تمامی اسامی جنس و گونه‌ها نیز باید در متن مقاله و فهرست منابع به ایتالیک نوشته شوند.**
۷. درج DOI اختصاصی هر مقاله در پایان ارجاع‌دهی الزامی است. اگر مقاله DOI نداشته باشد، باید آدرس دسترسی آنلاین (URL) ارائه گردد.
۸. در مورد منابعی که ماهیت چاپی دارند و DOI یا URL ندارند (مانند کتاب‌های قدیمی یا پایان‌نامه‌های داخلی)، ارائه اطلاعات کامل شامل محل نشر، ناشر، دانشگاه و شهر الزامی است.
۹. برای منابع اینترنتی، باید تاریخ دسترسی (Accessed date) نیز ذکر شود، زیرا محتوای آن‌ها ممکن است در آینده تغییر کند.
۱۰. استفاده از منابع جدید و معتبر (ترجیحاً ۳ تا ۵ سال اخیر) توصیه می‌شود. تنها در مواردی که نیاز به ارجاع به منابع کلاسیک، فرمول‌ها یا مکانیسم‌های پایه‌ای وجود دارد، می‌توان از منابع قدیمی‌تر استفاده کرد.

مروری کلی بر نحوه تهیه و ارسال مقاله

۱. مقاله حداکثر در ۲۰ صفحه A4 با فاصله خطوط تک‌فاصله و حاشیه‌های ۲/۵ سانتی‌متر از هر طرف و به صورت تک ستونی در نرم افزار Word 2007 یا نسخه‌های بالاتر تهیه شود.
۲. مقاله باید شامل بخش‌های اصلی شامل: عنوان و صفحه‌ مشخصات نویسندگان، چکیده (فارسی: ساده و انگلیسی: مبسوط)، واژگان کلیدی، مقدمه، مواد و روش‌ها، نتایج، بحث، نتیجه‌گیری و سایر موارد ذکر شده در این راهنما باشد. ارسال چکیده مبسوط انگلیسی همراه با متن مقاله الزامی است.
۳. نوع و اندازه قلم برای متن فارسی و انگلیسی باید مطابق جدول (۳) رعایت شود.
۴. پیش از نقطه (۰) و ویرگول (،) گذاشتن فاصله لازم نیست، اما پس از آن‌ها یک فاصله باید لحاظ شود.
۵. اصول نگارش زبان فارسی باید به طور کامل رعایت گردد و از به کار بردن اصطلاحات انگلیسی که معادل فارسی آن‌ها در فرهنگستان زبان فارسی مصوب شده تا حد امکان پرهیز شود.

۶. شکل‌ها باید با کیفیت بالا و واضح برای بررسی و انتشار تهیه شوند. در صورت پایین بودن کیفیت شکل‌ها، مقاله برای اصلاح به نویسندگان بازگردانده می‌شود.
۷. ارسال فرم تعارض منافع و فرم تعهد نامه الزامی همراه با ارسال مقاله به نشریه الزامی است.
۸. تمامی مقالات پس از دریافت، توسط سردبیر و اعضای هیات تحریریه بررسی می‌شوند و در صورتی که در حوزه پوشش مجله باشند و حداقل کیفیت لازم را داشته باشند، برای ارزیابی به داوران ارسال می‌شوند. پس از دریافت رأی داوران و تأیید هیات تحریریه، مقاله در نوبت چاپ قرار می‌گیرد. توجه شود که ارسال مقاله به داوران به منزله انتشار آن نیست و انتشار مقاله تنها با تأیید داوران و اعضای هیات تحریریه امکان‌پذیر است.

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

| عنوان | قلم (فونت) | اندازه | نوع قلم |
|---|-----------------|--------|----------------|
| عنوان فارسی مقاله | B Mita | ۱۴ | پرنج |
| عنوان انگلیسی مقاله | Times New Roman | ۱۴ | پرنج |
| نام و نام خانوادگی مؤلفان (فارسی) | B Mita | ۱۲ | پرنج |
| نام و نام خانوادگی مؤلفان (انگلیسی) | Times New Roman | ۱۲ | پرنج |
| آدرس سازمانی نویسندگان (فارسی) | B Mita | ۱۰ | نازک |
| پست الکترونیکی نویسندگان (فارسی) | Times New Roman | ۸ | نازک، آبی رنگ |
| آدرس سازمانی نویسندگان (انگلیسی) | Times New Roman | ۹ | نازک |
| عنوان اصلی بخش‌ها | B Titr | ۱۲ | پرنج |
| عنوان زیر بخش‌ها | B Titr | ۱۱ | پرنج |
| متن چکیده فارسی | B Mita | ۱۱ | نازک |
| متن چکیده انگلیسی | Times New Roman | ۹ | نازک |
| کلیدواژه‌های فارسی | B Mita | ۱۰ | نازک و ایتالیک |
| کلیدواژه‌های انگلیسی | Times New Roman | ۹ | نازک |
| متن اصلی ^۱ | B Mita | ۱۳ | نازک |
| زیرنویس فارسی | B Mita | ۱۰ | نازک |
| زیرنویس لاتین | Times New Roman | ۸ | نازک |
| عنوان فارسی جدول‌ها و شکل‌ها ^۱ | B Mita | ۱۱ | نازک |
| عنوان انگلیسی جدول‌ها و شکل‌ها ^۱ | Times New Roman | ۹ | نازک |
| عنوان ستون‌های جدول‌ها | B Mita | ۱۰ | پرنج |
| متون فارسی درون جدول‌ها | B Mita | ۱۰ | نازک |
| متون لاتین درون جدول‌ها | Times New Roman | ۸ | نازک |
| فهرست منابع (باید انگلیسی باشد) | Times New Roman | ۱۱ | نازک |

۱. کلمات انگلیسی در متن فارسی باید با قلم Times New Roman و با دو اندازه کوچکتر از متن فارسی نوشته شوند.

۲. کلمه عنوان و شماره باید پررنگ باشد.

راهنمای پاسخ به نظرات داوران

- نویسنده/نویسندگان موظف‌اند حداکثر ظرف ۱۵ روز پس از دریافت نظرات داوران، اصلاحات لازم را انجام داده و فایل مقاله اصلاح‌شده را به همراه فایل پاسخ به داوران ارسال نمایند.
- در پاسخ به نظرات داوران، لازم است تمامی نظرات و پیشنهادات علمی به‌طور کامل در نسخه خطی اعمال شوند؛ مگر در مواردی که دلیل علمی و منطقی برای عدم اعمال آن وجود داشته باشد، که در اینصورت نویسنده باید در فایل پاسخ به داوران آن را ارائه دهد.
- نویسندگان باید یک فایل جداگانه با عنوان "**پاسخ به داوران**" تهیه کنند. در این فایل، نظر هر داور به‌صورت شماره‌گذاری شده ذکر گردد و بلافاصله پاسخ نویسنده با جزئیات کامل ارائه شود. در پاسخ‌ها باید دقیقاً مشخص شود که اصلاح مربوطه در

کدام بخش نسخه خطی (ذکر شماره صفحه) اعمال شده است. در صورت عدم اعمال برخی نظرات، باید توضیح و دلیل کافی ذکر شود.

۴. نویسندگان باید پیشنهادات و نظرات داوران را به صورت تفکیک شده پاسخ دهند، در فایل پاسخ به داوران باید به طور واضح مشخص باشد که هر نظر مربوط به کدام داور است. برای این کار بهتر است ابتدا تمام نظرات داور ۱، سپس نظرات داوران بعدی به ترتیب ارائه شود تا روند بررسی مجدد با سهولت و بدون ابهام صورت گیرد. برای این کار، بهتر است در فایل پاسخ داوران، ابتدا یک تیتیر تحت عنوان "پاسخ به نظرات داور x" تعریف شود و در ادامه نظرات آن داور و پاسخ نویسندگان به صورت زیر ارائه شود.

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

نمونه فرمت

پاسخ به نظرات داور ا:

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

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

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

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

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

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

برخی نکات مهم ویرایشی

۱. برای شماره گذاری از عدد و نقطه استفاده شود؛ مانند شماره گذاری همین بخش.
۲. در تهیه مقاله از هدینگ گذاری و شماره گذاری استفاده نکنید.
۳. قبل از نقطه، ویرگول، نقطه ویرگول، دونقطه، علامت سؤال، علامت تعجب و... نیازی به فاصله نیست؛ اما بعد از این علائم باید یک فاصله گذاشته شود.
۴. هنگام استفاده از پرانتز قبل از باز شدن پرانتز و بعد از بسته شدن پرانتز از فاصله استفاده کنید، کلمه داخل پرانتز بدون فاصله به پرانتز می چسبند.
۵. برای نوشتن کلمات مرکب یا بعضی افعال و واژگان مشابه از نیم فاصله استفاده شود (برای مثال انسان ها، می رود، تصمیم گیری، اندازه گیری، بهره مند، منطقه ای، همان گونه و...) [برای مثال می خواهم (غلط) - می خواهم (درست)] برای ایجاد نیم فاصله در نرم افزار WORD الزماً و حتماً از (ctrl + shift + 2) استفاده شود.
۶. به جای استفاده از علامت (%) در متن از کلمه درصد استفاده شود (مانند ۲۵ درصد).
۷. براساس دستورالعمل جدید فرهنگستان زبان و ادب فارسی از به کار بردن (هی) خودداری گردد و در موارد لازم از سریا (ة) استفاده شود.

نکات ضروری

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

اخلاق پژوهش و انتشار

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

۱. **اصالت مقاله:** مقاله باید حاصل پژوهش اصیل نویسندگان باشد و قبلاً در هیچ نشریه داخلی یا خارجی منتشر نشده و همزمان به نشریه دیگری ارسال نشده باشد.
 ۲. **مسئولیت نویسنندگان:** همه نویسندگان باید در طراحی، اجرا، تحلیل یا نگارش پژوهش نقش مؤثر داشته باشند. درج نام کسانی که مشارکت علمی نداشته‌اند (Gift Authorship) یا حذف افراد مشارکت‌کننده (Ghost Authorship) خلاف اصول اخلاقی است.
 ۳. **تعارض منافع:** نویسندگان موظف‌اند هرگونه منافع مالی، شخصی یا سازمانی که می‌تواند بر نتایج پژوهش یا تفسیر آنها اثر بگذارد را به صورت شفاف در فرم تعارض منافع اعلام نمایند.
 ۴. **تأیید منابع مالی و حمایتی:** در صورت استفاده از حمایت مالی یا پشتیبانی سازمانی، باید در بخش «تقدیر و تشکر» مقاله ذکر شود.
 ۵. **سرقت علمی و مشابهت‌یابی:** مقالات قبل از ارسال به داوران توسط نرم‌افزار مشابهت‌یابی بررسی می‌شوند. هرگونه سرقت علمی، تحریف داده‌ها یا استفاده بدون استناد مناسب به منابع، منجر به رد فوری مقاله و اطلاع‌رسانی به نهادهای ذی‌ربط خواهد شد.
 ۶. **داده‌ها و مستندات:** نویسندگان باید در صورت نیاز، داده‌های خام پژوهش را در اختیار هیات تحریریه قرار دهند و در نگهداری داده‌ها پس از انتشار مسئول هستند.
 ۷. **اصلاح یا پس‌گرفتن مقاله:** در صورت مشاهده خطاهای اساسی علمی یا اخلاقی پس از انتشار، نشریه حق دارد مقاله پس بگیرد (Retraction) و موضوع را اطلاع‌رسانی نماید.
- ** همچنین همه نویسندگان باید تأیید کنند که:**
- در طراحی، اجرا یا نگارش پژوهش مشارکت داشته‌اند.
 - با نسخه نهایی مقاله موافق بوده و آن را تأیید کرده‌اند.
 - مقاله به‌طور همزمان به نشریه دیگری ارسال نشده است.

فرایند داوری و زمان‌بندی عمومی

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

فرایند داوری به‌طور معمول شامل مراحل زیر است:

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

زمان‌بندی عمومی فرایند:

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

**** در مجموع، بسته به کیفیت اولیه مقاله و میزان اصلاحات موردنیاز، فرایند داوری و پذیرش معمولاً بین ۱ تا ۲**

ماه زمان خواهد برد.

هزینه‌ها، حق نشر و دسترسی آزاد

۱. **کمک هزینه بررسی و داوری:** برای انجام مراحل داوری و ویرایش اولیه هر مقاله، مبلغ ۲۰۰۰،۰۰۰ ریال (دویست هزار تومان) از نویسنده(گان) دریافت می‌شود. این مبلغ باید همزمان با ارسال مقاله برای داوری پرداخت گردد.
۲. **کمک هزینه انتشار مقاله پذیرفته‌شده:** در صورت پذیرش مقاله، مبلغ ۲۰۰۰،۰۰۰ ریال (دویست هزار تومان) دیگر برای تأمین بخشی از هزینه‌های انتشار از نویسنده(گان) دریافت خواهد شد. بنابراین، مجموع هزینه‌های مربوط به بررسی و چاپ هر مقاله ۴۰۰۰،۰۰۰ ریال (چهارصد هزار تومان) خواهد بود.
۳. **حق نشر:** حق نشر مقاله پس از انتشار همچنان با رعایت قوانین مجله، متعلق به نشریه است.
۴. **دسترسی به مقالات:** مقالات پذیرش شده در نشریه پژوهش‌های خاک، برای همه خوانندگان به صورت رایگان و بدون محدودیت قابل دسترس خواهد بود.
۵. **استفاده و ارجاع به مقاله:** پس از انتشار، استفاده از مطالب مقاله توسط دیگران با ذکر منبع اصلی مجاز است، مشروط بر رعایت قوانین اخلاق نشر و ارجاع‌دهی صحیح.

چک‌لیست ارسال

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

۱. نسخه کامل مقاله

✓ مقاله مطابق فرمت و ساختار نشریه (حداکثر ۲۰ صفحه، فاصله خطوط ۱، حاشیه ۲/۵ سانتی‌متر، تک ستونی) آماده شده باشد.

✓ شامل تمامی بخش‌های اصلی مقاله (عنوان، چکیده فارسی و انگلیسی، مقدمه، مواد و روش‌ها، نتایج، بحث، نتیجه‌گیری، منابع و پیوست‌ها) باشد.

۲. چکیده مفصل به زبان انگلیسی

✓ ارسال چکیده انگلیسی همراه مقاله الزامی است.

۳. فرم تعهدنامه نویسندگان

✓ تکمیل و امضا شده توسط همه نویسندگان مقاله.

۴. نامه درخواست چاپ مقاله

✓ شامل درخواست رسمی نویسنده مسئول و ذکر اطلاعات تماس.

۵. فایل پاسخ به داوران (در صورت بازبینی مقاله پس از داوری)

✓ شامل پاسخ تک‌به‌تک به تمام نظرات و پیشنهادات داوران با ذکر شماره صفحه و خط اصلاح شده.

✓ پاسخ‌ها با رنگ متفاوت (مثلاً آبی) مشخص شده و همه اصلاحات در متن با Track Changes اعمال شده باشد.

۶. مدارک پرداخت هزینه‌ها (در صورت ارسال مقاله برای داوری یا پذیرش)

✓ پرداخت کمک هزینه داوری و ویرایش اولیه (۲۰۰ هزار تومان)

۷. فایل‌های ضمیمه دیگر

✓ جداول و شکل‌ها با کیفیت مناسب (حداقل ۳۰۰ dpi)

✓ هر فایل اضافی مانند پیوست داده‌ها، تصاویر تکمیلی یا اطلاعات مربوط به منابع خاص.

فرم تعهدنامه

نشریه پژوهش‌های خاک

اینجانب..... نویسنده مسئول و مکاتبه‌کننده مقاله با عنوان:

"....." متعهد می‌گردم:

۱. کلیه نویسندگان مقاله حاضر از ارسال آن به نشریه پژوهش‌های خاک آگاه بوده و با آن موافقت کامل دارند.
 ۲. این مقاله تا کنون به هیچ مجله داخلی یا خارجی ارسال نشده است.
 ۳. تا تعیین وضعیت نهایی در نشریه حاضر، منحصراً در اختیار این نشریه باقی خواهد ماند.
 ۴. نام تمامی اساتید راهنما، مشاوران و همکاران مؤثر در مقاله درج شده باشد. لازم به ذکر است پس از ارسال مقاله به نشریه، هیچگونه حذف، اضافه و تغییر در ترتیب اسامی نویسندگان امکان‌پذیر نخواهد بود.
- * در غیر این صورت، دفتر نشریه از ادامه برر سی مقاله معذور خواهد بود. همچنین، در صورت احراز هرگونه تخلف در موارد فوق (حتی بعد از انتشار)، نشریه حق بازپس‌گیری مقاله را برای خود محفوظ می‌دارد.

حق کپی رایت و انتشار: نشریه پژوهش‌های خاک دارای دسترسی آزاد بوده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution 4.0 International License منتشر می‌شود. بر اساس این مجوز، اجازه استفاده، تکثیر، بازآفرینی، باز ترکیب و انتشار محتوا با ذکر منبع برای همگان آزاد است.

امضاء نویسنده مسئول:

تاریخ:

تأییدیه نویسندگان همکار

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

امضاء:

تاریخ:

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

امضاء:

تاریخ:

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

امضاء:

تاریخ:

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

امضاء:

تاریخ:


تعداد داوری

اسامی داوران

| | |
|---|-------------------------|
| ۱ | دکتر ابراهیم ادهمی |
| ۱ | دکتر حسن اعتصامی |
| ۲ | دکتر محمدرضا پهلوان راد |
| ۲ | دکتر کبری ثقفی |
| ۳ | دکتر میثم چراغی |
| ۱ | دکتر امیر خوش گفتارمنش |
| ۴ | دکتر مهدی سرچشمه پور |
| ۲ | دکتر جهانشاه صالح |
| ۱ | دکتر نعیمه عنایتی ضمیر |
| ۱ | مهندس سعید غالبی |
| ۱ | دکتر سید علی غفاری نژاد |
| ۳ | دکتر شاهرخ فاتحی |
| ۴ | دکتر مجتبی مقبلی |
| ۱ | دکتر نفیسه یغمائیان |



Spatial Modeling and Prediction of the Soil Fertility Index in Two Arid and Semi-Arid Regions of Ilam Province, Iran

Asghar Rahmani^a, Mahmood Rostaminiya^{*b} , Nasibeh Sayedi^c, and Seyed Roohollah Mousavi^d

^a Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

^b Department of Soil and Water, Faculty of Agriculture, University of Ilam, Ilam, Iran.

^c Department of Soil and Water, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Tehran, Iran.

^d Department of Soil Science, University of Tehran, Karaj, Iran.

Article Info

Article Type
Research Article

Received
November 29, 2025

Revised
February 25, 2026

Accepted
April 13, 2026

Published online
June 17, 2026

Keywords

Digital soil mapping,
Soil fertility index,
Auxiliary variables,
Machine learning,
spatial interpolation

***Corresponding author's email**

mroostaminy@yahoo.com

Extended Abstract

Background and Objectives: Soil fertility is one of the most critical factors determining the sustainability of agricultural ecosystems and ensuring food security. Declining soil fertility directly affects crop productivity and, consequently, food security. Understanding the spatial variability of fertility distribution patterns is essential for efficient soil management. In recent years, the integration of advanced machine learning algorithms with geostatistical methods has provided powerful tools for modeling and predicting soil fertility indicators such as the Soil Fertility Index (SFI). In arid and semi-arid regions, water scarcity, soil salinity, and climatic variability are major challenges for sustainable agricultural production. Therefore, spatial modeling of soil fertility and identification of its driving factors can serve as a scientific basis for regional land-use planning and resource management. The present study aimed to model and predict the spatial distribution of SFI in two arid and semi-arid regions, Miameh–Dehloran and Valiasr–Badreh (Ilam Province, western Iran), using Random Forest (RF) and Cubist (CB) machine learning algorithms, and to compare their performance with the conventional Ordinary Kriging (OK) method. Ultimately, this research seeks to develop a region-based spatial model for SFI prediction in the agricultural lands of the Zagros region in western Iran.

Materials and Methods: Soil sampling was conducted in the Miameh–Dehloran and Valiasr–Badreh areas using the conditioned Latin hypercube sampling (cLHS) method. A total of 133 and 71 surface soil samples were collected from the respective regions. The samples were analyzed for physical, chemical, and biological properties to calculate the Soil Fertility Index (SFI). Auxiliary environmental variables, including topographic parameters derived from the Digital Elevation Model (DEM) and remote sensing (RS) indices, were used as predictors. The most relevant variables were selected using the Variance Inflation Factor (VIF) and Boruta algorithms, resulting in 9 and 12 selected predictors for the Miameh–Dehloran and Valiasr–Badreh sites, respectively. Additionally, two climatic variables—mean annual precipitation (MAP) and mean annual temperature (MAT)—were included based on expert judgment. The RF, CB, and OK models were trained and validated, and their predictive performances were evaluated using the coefficient of determination (R^2) and root mean square error (RMSE). Spatial prediction maps of SFI were generated in ArcGIS based on the best-performing model.

Results: The results indicated that the Random Forest model outperformed both the Cubist and Ordinary Kriging models in predicting SFI values. The R^2 of RF was 0.79 for Miameh–Dehloran and 0.60 for Valiasr–Badreh, while the RMSE values were 0.64 and 0.69, respectively. These results demonstrate the superior ability of RF in capturing nonlinear relationships between soil fertility and environmental covariates. According to the spatial distribution maps,

2/ Soil Quality Monitoring: An Undeniable Necessity

approximately 74.14% of the Miameh–Dehloran and 77.33% of the Valiasr–Badreh areas fell within the “very high” (F1) and “high” (F2) fertility classes, indicating considerable potential for agricultural productivity. The climatic variables MAT and MAP were identified as the most influential predictors of SFI. In Miameh–Dehloran, remote sensing indices—especially vegetation and spectral reflectance indicators—played a major role, whereas in Valiasr–Badreh, topographic parameters such as elevation, slope, and aspect were more dominant. These spatial differences reflect the contrasting climatic and geomorphological conditions of the two regions. Combining RF with RS and topographic data significantly improved prediction accuracy and enabled the generation of high-resolution fertility maps suitable for precision agriculture applications.

Conclusion: The findings highlight the potential of the Random Forest algorithm as a robust and reliable approach for spatial modeling of soil fertility in arid and semi-arid environments. RF effectively captured complex interactions among climatic, topographic, and spectral variables, leading to accurate and detailed SFI prediction maps. The study confirmed that climatic variables, particularly temperature and precipitation, play a decisive role in determining the spatial variability of soil fertility. The resulting maps can serve as valuable tools for agricultural planning, selection of suitable crop types, and sustainable management of soil and water resources. Overall, the proposed modeling framework provides an efficient strategy for optimizing land potential, improving crop yields—especially for wheat—and contributing to food security and sustainable agricultural development in the drylands of western Iran.

Cite this article: Rahmani, A., Rostaminiya, M., Sayedi, N., Mousavi, S.R., 2026. Spatial Modeling and Prediction of the Soil Fertility Index in Two Arid and Semi-Arid Regions of Ilam Province, Iran. Research Article, *Journal of Soil Research*, 40 (1), pp 1-21.



DOI: <https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.371527.803>

Publisher: Soil Science Society of Iran



مدل‌سازی مکانی و پیش‌بینی شاخص حاصلخیزی خاک در دو منطقه خشک و نیمه‌خشک استان ایلام

اصغر رحمانی^۱، محمود رستمی نیا^{۲*} ID، نسیمه صیدی^۳، سید روح اله موسوی^۴

^۱ مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

^۲ گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران.

^۳ گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

^۴ گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

| اطلاعات مقاله | چکیده |
|---|---|
| <p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۰۸</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۰۶</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۲۴</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۲۷</p> <p>واژه‌های کلیدی: درون‌یابی مکانی، شاخص حاصلخیزی خاک، متغیرهای کمکی، نقشه برداری رقومی خاک، یادگیری ماشین</p> <p>* ایمیل نویسنده مسئول: m.rostamina@ilam.ac.ir</p> | <p>استفاده از رویکردهای معمول شناسایی حاصلخیزی خاک در مناطق با وسعت زیاد، فعالیتی زمان‌بر و پرهزینه است. از این رو پژوهش حاضر با هدف مدل‌سازی و پیش‌بینی پراکنش مکانی شاخص حاصلخیزی خاک (SFI) در دو منطقه خشک (دهلران) و نیمه‌خشک (بدره) در استان ایلام، با استفاده از مدل‌های جنگل تصادفی (RF)، کوبیت (CB) و کریجینگ معمولی (OK) انجام شد. در مجموع ۲۰۴ نمونه خاک از افق سطحی دو منطقه به روش ابرمکعب لاتین برداشته و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها اندازه‌گیری شد. متغیرهای محیطی شامل شاخص‌های توپوگرافی، سنجش از دور و اقلیمی (میانگین بارش و دمای سالانه) به‌عنوان ورودی مدل‌ها استفاده شد. انتخاب متغیرهای مؤثر به دو روش «شاخص تورم واریانس» (VIF) و الگوریتم «باروتا» (Boruta) انجام شد. در نهایت، ۹ متغیر در منطقه دهلران و ۱۲ متغیر در منطقه ولیعصر بدره انتخاب شد. نتایج نشان داد مدل RF با مقادیر R^2 برابر ۰/۷۹ و ۰/۶۰ و RMSE برابر ۰/۶۴ و ۰/۶۹ به ترتیب در اراضی دهلران و بدره، دقت بالاتری نسبت به دو مدل دیگر دارد. نقشه‌های پهنه‌بندی نشان داد که بیش از ۷۰ درصد اراضی هر دو منطقه در کلاس‌های حاصلخیزی زیاد و بسیار زیاد قرار دارند. بررسی اهمیت متغیرها بیانگر نقش کلیدی میانگین دمای سالانه (MAT) و بارش (MAP) در تغییرپذیری SFI در هر دو منطقه مطالعاتی است. همچنین، شاخص‌های سنجش از دور در دهلران و عوامل توپوگرافی در بدره تأثیر بیشتری داشتند. به طور کلی، ترکیب الگوریتم RF با داده‌های اقلیمی، توپوگرافی و سنجش از دور، ابزاری کارآمد برای تولید نقشه‌های دقیق حاصلخیزی خاک فراهم می‌آورد.</p> |

استناد: رحمانی، ا.، رستمی نیا، م.، صیدی، ن.، موسوی، س.ر.، ۱۴۰۵. مدل‌سازی مکانی و پیش‌بینی شاخص حاصلخیزی خاک در دو منطقه خشک و

نیمه‌خشک استان ایلام. مقاله پژوهشی، نشریه پژوهش‌های خاک، (۱) ۴۰، ص ۱-۲۱.

DOI: <https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.371527.803>



اقلیمی و توپوگرافی، اهمیت نسبی ثابتی ندارند و میزان تأثیر آن‌ها در مدل‌سازی مکانی و پیش‌بینی ویژگی‌های خاک می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی تغییر نماید (Hobley et al., 2015; Adhikari et al., 2014).

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی از این رویکرد برای مدل‌سازی و تهیه نقشه ویژگی‌های کلیدی حاصلخیزی خاک، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، استفاده نمودند. برای نمونه، Rahmani و همکاران (۲۰۲۲) با هدف تعیین ضخامت خاک سطحی حاصلخیز در اراضی کشاورزی دشت قزوین و Mousavi و همکاران (۲۰۲۲) در مدل‌سازی فسفر در دسترس و پتاسیم قابل‌تبادل، کارایی مدل‌های یادگیری ماشین را در نقشه‌برداری رقومی این ویژگی‌ها بررسی نمودند. نتایج این مطالعات نشان داد که مدل جنگل تصادفی (RF) نسبت به سایر الگوریتم‌های یادگیری ماشین عملکرد بهتری در پیش‌بینی ویژگی‌های مؤثر بر حاصلخیزی خاک دارد. همچنین تحقیقاتی که توسط Rostaminia و همکاران (۲۰۲۱) در یک منطقه خشک از استان ایلام و توسط Matinfar و همکاران (۲۰۲۱) در یک منطقه نیمه‌خشک انجام شد، مؤید توانمندی بالای رویکردهای یادگیری ماشین در تهیه نقشه مکانی کربن آلی خاک و سایر ویژگی‌های مرتبط با حاصلخیزی بود. با این حال، اغلب مطالعات انجام‌شده تاکنون (Zeraatpisheh et al., 2019; Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2020; Parsaie et al., 2021; Mousavi et al., 2024) عمدتاً بر مدل‌سازی و نقشه‌برداری تک ویژگی‌های مؤثر بر حاصلخیزی خاک متمرکز بوده‌اند، در حالی که برای حمایت از تصمیم‌گیری‌های کاربردی و مدیریت بهینه منابع خاک، توجه به رویکردی جامع‌تر در قالب شاخص حاصلخیزی خاک^۴ (SFI) ضرورت داشته و بیانگر خلأ تحقیقاتی محسوس در این حوزه است (Peng et al., 2022).

در اندک مطالعات انجام‌شده در ایران، ارزیابی وضعیت کلی وضعیت حاصلخیزی خاک‌های کشور توسط Shahbazi (2013) and Besharati با تحلیل ۳۱۵ هزار داده طی یک دوره ده ساله (۱۳۸۱ تا ۱۳۹۱) صورت گرفت. اگرچه این پژوهش اطلاعات آماری ارزشمندی درباره ویژگی‌های تأثیرگذار بر حاصلخیزی خاک ارائه داد، اما هم‌چنان نبود یک شاخص کمی و مکان‌مبنا برای ارزیابی و پایش حاصلخیزی خاک مشهود بود. مطالعات اندکی نیز با هدف کمی‌سازی و پهنه‌بندی SFI در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور انجام شده است؛ از جمله پژوهش Meymand و همکاران (۲۰۲۳) در دشت هنام استان لرستان، ضمن تأکید بر ضرورت انجام تحقیقات بیشتر با محوریت

خاک یکی از مهم‌ترین اجزاء اکوسیستم است که محیطی مناسب برای ذخیره عناصر غذایی و انجام فرآیندها و فعالیت‌های بیولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی است (Peng et al., 2022). استفاده از خاک به‌عنوان یکی از عوامل اصلی در تولید محصولات کشاورزی باید بر اساس اصول صحیح و علمی صورت پذیرد تا بتوان از آن در تولید محصولات کشاورزی به‌عنوان یک منبع پایدار نام برد. حاصلخیزی خاک به قابلیت خاک برای ارائه مواد مغذی مختلف برای رشد محصولات کشاورزی اشاره دارد که بر عملکرد محصول به طرز قابل‌توجهی تأثیر می‌گذارد (Zaheri Abdehvand et al., 2024). ارزیابی علمی حاصلخیزی خاک می‌تواند به عنوان مرجعی برای توصیه‌های کودی بهینه مورد استفاده قرار گیرد (Yi et al., 2014). تعیین وضعیت حاصلخیزی خاک بر اساس رویکردهای معمول شناسایی خاک مبتنی بر مشاهدات میدانی متراکم و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی از خصوصیات شیمیایی (واکنش خاک، ماده آلی، فسفر در دسترس، پتاسیم قابل استفاده، نیتروژن کل و عناصر میکرو) است. به طور کلی استفاده از این رویکرد با هدف کسب اطلاعات دقیق مکانی برای مناطق مطالعاتی با وسعت زیاد، معمولاً فعالیتی زمان‌بر و پرهزینه است (Wang et al., 2018; Huang et al., 2022; Mousavi et al., 2022).

به منظور غلبه بر محدودیت‌های موجود در رویکرد معمول، نقشه‌برداری رقومی خاک^۱ (DSM) با تلفیق دانش کارشناس، مدل‌های یادگیری ماشین و استفاده از متغیرهای محیطی با دسترسی سریع و ارزان می‌تواند به طور مؤثری نقش آفرینی کند (McBratney et al., 2003; Lagacherie, 2008; Zhang and Feng, 2017). با افزایش قابلیت‌های دسترسی سامانه‌های اطلاعات مکانی^۲ (GIS) و توان پردازشی سیستم‌های رایانه‌ای و فاکتورهای خاک‌سازی در فرمت رقومی، مدل فاکتور-حالت‌ینی، به‌عنوان یک معادله مکانی ناکارآمد تلقی شد (Jenny, 1994)، به همین دلیل McBratney و همکارانش (۲۰۰۳) یک چارچوب نظری از تغییرات مکانی خاک را تحت عنوان مدل اسکورپن^۳ پیشنهاد نمودند. در مقیاس‌های منطقه‌ای و محلی، نقشه‌برداری رقومی خاک به‌عنوان ابزاری کارآمد برای رفع چالش‌های مربوط به ناهمگنی مکانی خاک و ارتباط آن با زمین‌نما^۴ به کار گرفته می‌شود. در این میان، فاکتورهای محیطی به‌عنوان نماینده فاکتورهای خاک‌سازی نقش کلیدی در عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین دارند. این متغیرها، بسته به تفاوت‌های

^۴ Landscape

^۵ Soil Fertility Index

^۱ Digital soil mapping

^۲ Geographic information system

^۳ Scorpan Model

میلی‌متر و ۱۶/۶ درجه سانتی‌گراد است. دارای رژیم رطوبتی زیریک^۶ و رژیم حرارتی ترمیک^۷ است (Bannai, 1998). همچنین بر اساس طبقه‌بندی ارائه شده توسط دومارتن در کلاس اقلیمی نیمه‌خشک واقع شده است. کاربری غالب اراضی در بدره به صورت گندم و جو دیم با غالبیت سطح زیر کشت گندم است.

منطقه خشک اراضی مجاور رودخانه میمه در شهرستان دهلران

منطقه دوم با مساحت ۳۱۶۰ هکتار در اطراف رودخانه میمه، در منطقه فرخ‌آباد شهرستان دهلران، در موقعیت مکانی ۱۱°۱۲'۴۷" تا ۱۱°۱۱'۴۸" طول شرقی و ۳۵°۳۲' تا ۳۳°۳۹'۲۸" عرض شمالی واقع گردیده است (شکل ۱). اراضی مورد نظر بخشی از اراضی دشت بزرگ دهلران محسوب می‌شوند. از نظر تغییرات ارتفاعی در محدوده‌ی حداقل و حداکثر مقادیر ۱۲۴ تا ۱۶۷ متر از سطح دریای آزاد و در تیپ اراضی دشت‌های رسوبی رودخانه‌ای قرار دارد. همچنین از نظر فاکتورهای اقلیمی نیز با متوسط بارندگی سالانه ۲۷۷/۳ میلی‌متر و متوسط سالانه دمای منطقه حدود ۲۶/۳ درجه سانتی‌گراد، دارای رژیم رطوبتی یوستیک^۸ و رژیم حرارتی هایپرترمیک^۹ با اقلیم خشک بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن است. کاربری غالب اراضی در میمه به صورت گندم آبی است.

مطالعات میدانی و تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی

برای انجام نمونه‌برداری خاک در مناطق مورد مطالعه، اطلاعات مورد نیاز از جمله نقشه‌های توپوگرافی و تصاویر ماهواره‌ای دو منطقه تهیه شد. در مجموع ۷۱ نمونه خاک از افق سطحی در منطقه اول و ۱۳۳ نمونه از منطقه دوم با استفاده از روش نمونه‌برداری ابرمکعب لاتین مشروط^{۱۰} (Minasny et al., 2006) جانمایی و بر اساس اصول مطالعات میدانی (Schoeneberger et al., 2012) برداشت گردید. پس از جمع‌آوری نمونه‌ها و انتقال آن‌ها به آزمایشگاه، هوا خشک و سپس از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شد. تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی شامل مقدار قابل دسترس عناصر کم مصرف مس (Cu)، آهن (Fe)، منگنز (Mn) و روی (Zn)، واکنش خاک (pH)، قابلیت هدایت الکتریکی (EC)، درصد کربن آلی (SOC) بر اساس روش - های استاندارد موجود انجام گرفت (Shahbazi et al., 2024).

ارزیابی کارایی مدل‌های یادگیری ماشین و نقش فاکتورهای محیطی، نشان دادند که تخلیه عناصر غذایی خاک به‌ویژه فسفر و روی، همراه با مقادیر بالای کربنات کلسیم معادل و بافت سنگین، مهم‌ترین عوامل محدودکننده حاصلخیزی خاک‌های منطقه هستند. در پژوهشی دیگر در اراضی کشاورزی استان خوزستان (Zaheri Abdevand., 2025) شاخص کلی حاصلخیزی را با استفاده از مدل ترکیبی یادگیری ماشین جنگل تصادفی با روش‌های زمین آماری با دقت مناسبی پیش‌بینی کردند. این محققین بر توسعه تحقیقات کمی‌سازی SFI و پهنه‌بندی مکانی آن با رویکردهای یادگیری ماشین تأکید نمودند؛ بنابراین پژوهش حاضر در دو منطقه با اقلیم خشک و نیمه‌خشک در استان ایلام در جهت رفع محدودیت‌های موجود در رویکردهای معمول ارزیابی SFI با اهداف (۱) مقایسه کارایی رویکردهای یادگیری ماشین و زمین‌آماري در پیش‌بینی SFI (۲) تهیه نقشه - های پهنه‌بندی SFI در مناطق مطالعاتی و (۳) معرفی مهم‌ترین فاکتورهای محیطی تأثیرگذار بر SFI منطقه طراحی گردید که می‌تواند در ارتقای بهره‌وری از اراضی کشاورزی مناطق خشک و نیمه‌خشک مؤثر باشد؛ بنابراین انتظار می‌رود با داشتن نقشه‌های پهنه‌بندی از وضعیت حاصلخیزی خاک‌های منطقه و شناخت دقیق از فاکتورهای محیطی مؤثر بر آن، کشاورزان و مدیران بتوانند بهترین روش‌های مدیریت خاک را انتخاب و در برنامه - ریزی‌های مربوط به ارتقاء حاصلخیزی خاک‌های زراعی بکار گیرند.

مواد و روش‌ها

مناطق مورد مطالعه

مطالعه حاضر برای بررسی وضعیت حاصلخیزی خاک‌ها در دو منطقه مطالعاتی با اقلیم خشک و نیمه‌خشک در استان ایلام انجام گردید.

منطقه نیمه‌خشک ولیعصر بدره

منطقه اول با مساحت ۱۸۰۰ هکتار بخشی از اراضی شهرک ولیعصر واقع در شهرستان بدره، با موقعیت مکانی ۲۴°۵۲' تا ۲۵°۱۲'۴۷" طول شرقی و ۳۳°۱۴'۳۳" تا ۳۳°۲۲'۱۵" عرض شمالی واقع گردیده است (شکل ۱). از نظر وضعیت اقلیمی به ترتیب با میانگین بارندگی و دمای سالانه ۵۵۴/۵

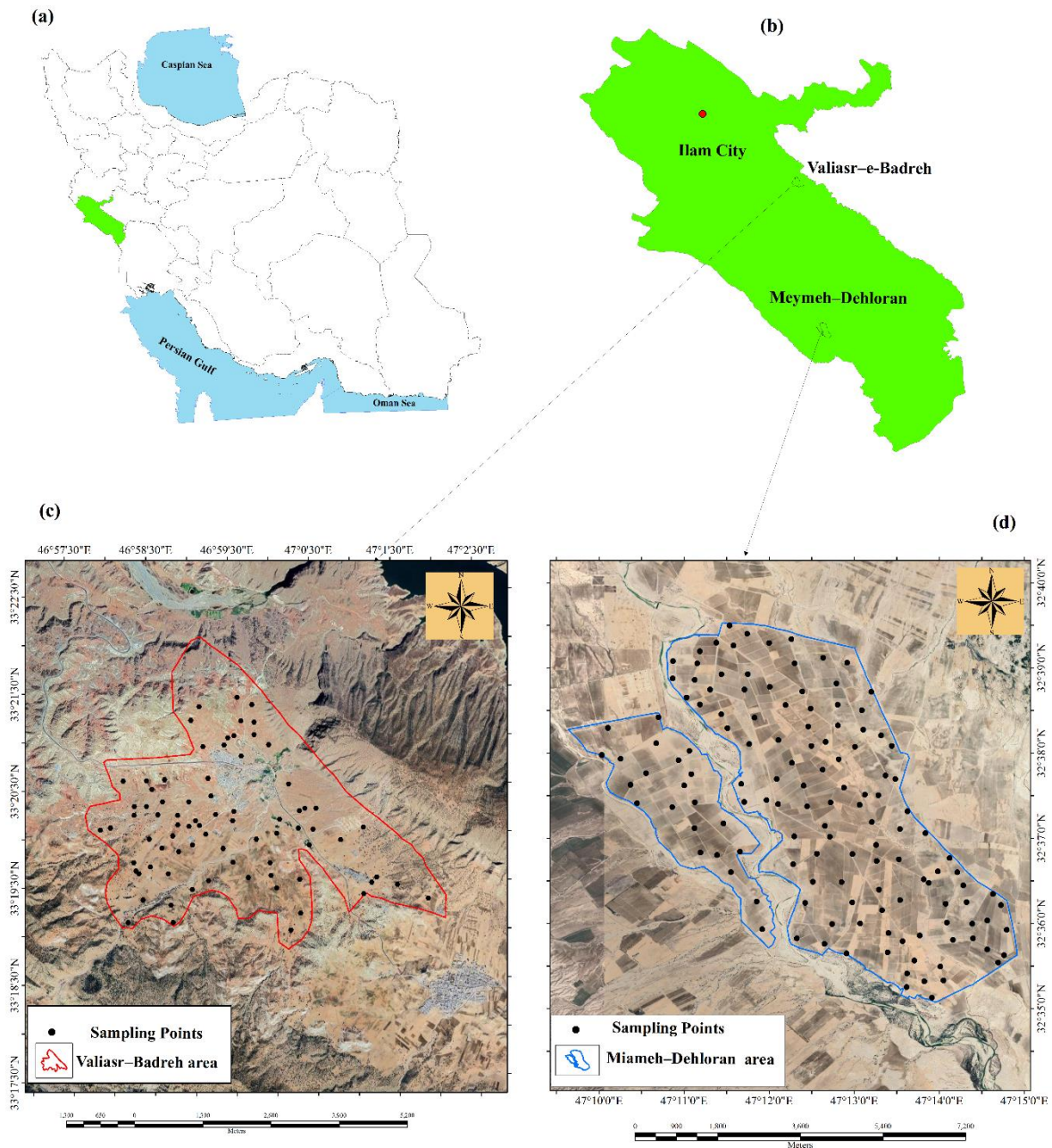
⁹ Hyperthermic

¹⁰ Condition latin hypercube sampling

⁶ Xeric

⁷ Thermic

⁸ Ustic



شکل ۱- موقعیت مناطق مطالعاتی و نقاط نمونه‌برداری در ایران و استان ایلام. منطقه ولیعصر بدره (a) و منطقه میمه دهلران (b). Figure 1. Location of the studied areas and sampling points in relation to Iran (a) and Ilam Province (b). Valiasr-e-Badreh area (c) and Meymeh-Dehloran area (d).

حاصلخیزی خاک بر اساس سیستم طبقه‌بندی روش ریشه دوم (رابطه ۱) انجام شد (Tunçay et al., 2021).

$$SFI = R_{max} \times \sqrt{\left[\frac{R_1}{100} \times \frac{R_2}{100} \times \dots \right]} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه، R_{max} بالاترین مقادیر تعلق گرفته به یک ویژگی در میان ویژگی‌های موردبررسی است و R_1 و R_2 درجات تعلق گرفته به سایر ویژگی‌های خاک است. مبنای محاسبه SFI در این رابطه به این صورت است که به هر ویژگی اندازه‌گیری شده

کمی‌سازی شاخص حاصلخیزی خاک

در این تحقیق، کمی‌سازی شاخص SFI بر اساس جدول استاندارد احتیاجات گیاهی محصول گندم به عنوان محصول غالب زراعی در هر دو دشت (جدول ۱)، برای هر یک از نقاط نمونه‌برداری محاسبه شد. طبقه‌بندی نهایی شاخص

جدول ۱). دامنه عوامل مؤثر بر حاصلخیزی خاک در این جدول بر اساس دستورالعمل مدیریت تلفیقی حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه گندم تهیه گردیده است (Moshiri et al., 2013).

بر اساس روش پارامتریک یک درجه‌بندی کمی بین ۰ تا ۱۰۰ تخصیص داده می‌شود. به این ترتیب، اگر یک خصوصیت کاملاً مطلوب باشد، درجه ۱۰۰ را دریافت می‌کند و اگر دارای محدودیت باشد، در رتبه‌های کمتر از ۱۰۰ درجه‌بندی می‌شود

جدول ۱- رتبه‌بندی عوامل مؤثر بر حاصلخیزی خاک برای کشت گندم (Moshiri et al., 2013)

| ویژگی‌های خاک | درجه تخصیص یافته به هر عنصر | | | | |
|---------------------------|-----------------------------|----------|-----------|-----------|----------|
| | 100 | 80 | 50 | 20 | 10 |
| EC (dS m ⁻¹) | 0-4 | 4-8 | 8-16 | >16 | - |
| pH | 7-7.5 | 7.5-8.2 | 8.2-8.5 | >8.5 | - |
| Fe (mg.kg ⁻¹) | > 7.5 | 7.5-5 | 5-2.5 | <2.5 | - |
| Mn (mg.kg ⁻¹) | 15-10 | 10-6.0 | 6.0-4.0 | 4.0-2.0 | < 2.0 |
| Cu (mg.kg ⁻¹) | 2.0-1.0 | 1.0-0.75 | 0.75-0.50 | 0.50-0.25 | <0.25 |
| Zn (mg.kg ⁻¹) | 2.0-1.0 | 1.0-0.75 | 0.75-0.50 | 0.50-0.25 | <0.25 |
| SOM (%) | >2 | 2-1 | 1-0.5 | 0.5-0.25 | 0.25-0.1 |

اگر مقادیر شاخص بیشتر از ۶۰ باشد:

$$\text{CSFI} = 75 + ((\text{SFI}) - 60) \times 0.62 \quad \text{رابطه (۲)}$$

اگر مقادیر شاخص بین ۶۰ - ۲۴ باشد:

$$\text{CSFI} = 50 + ((\text{SFI}) - 24) \times 0.410 \quad \text{رابطه (۳)}$$

اگر مقادیر شاخص بین ۲۴ - ۵ باشد:

$$\text{CSFI} = 25 + ((\text{SFI}) - 5) \times 0.455 \quad \text{رابطه (۴)}$$

در رابطه (۱)، با افزایش عوامل محدودیت‌زا، شاخص محاسبه شده به‌طور غیرمعمولی کاهش می‌یابد و مقادیری کمتر از مقدار واقعی را برآورد می‌کند (Sys, 1991). به همین منظور با استفاده از توابع ارائه شده توسط Sys (1991)، برای اصلاح شاخص SFI و ارتقاء شاخص نهایی، به‌منظور تطبیق بیشتر نتایج با واقعیت از روابط ۲، ۳ و ۴ استفاده شد. رتبه‌بندی این شاخص بر اساس (جدول ۲) انجام شد (Nariyanti et al., 2022).

جدول ۲- طبقه‌بندی حاصلخیزی خاک با استفاده از مقادیر شاخص SFI (Sys, 1991)

| SFI Ranking | SFI values |
|----------------|------------|
| (F5) Very Low | 0.0-12.5 |
| (F4) Low | 12.5-25 |
| (F3) Moderate | 25-50 |
| (F2) High | 50-75 |
| (F1) Very High | 75-100 |

باروتا^{۱۳} انجام گرفت. برای تعیین میزان هم خطی بودن بین متغیرهای کمکی، فاکتور تورم واریانس (VIF) در نرم‌افزار SPSS (V.20) محاسبه شد و آن دسته از متغیرهای کمکی که هم‌خطی بیش از ۱۰ داشتند از مجموعه کلی حذف گردید. در گام بعد الگوریتم باروتا در محیط نرم‌افزار آماری R بر روی مابقی متغیرهای کمکی برآزش داده شد و در نهایت دسته داده نهایی مرتبط از میان متغیرهای کمکی انتخاب گردید. الگوریتم باروتا دارای قابلیت تشخیص روابط خطی و غیرخطی در میان متغیرهای کمکی است و از مدل جنگل تصادفی (RF) برای انتخاب

متغیرهای محیطی و فرآیندهای انتخاب آن‌ها

در این پژوهش از تصاویر داده‌های ماهواره سنتینل-۲ و مدل رقومی ارتفاع^{۱۱} (DEM) (ALOSPALSAR, 2006-) (2011) به ترتیب به عنوان منبع داده‌های سنجش از دور و توپوگرافی استفاده شد. دو پارامتر اقلیمی نقشه‌های بارش و دما با استفاده از داده‌های هواشناسی سال‌های ۱۳۶۶ تا ۱۳۸۹ مستخرج از ایستگاه‌های سینوپتیک استان ایلام با روش درون‌یابی کریجینگ عام تهیه گردید (Karimi et al., 2014). مهم‌ترین متغیرهای محیطی بر اساس دو روش فاکتور تورم واریانس^{۱۲} و

¹³ Boruta

¹¹ Digital Elevation Model

¹² Variance inflation factor

روش کریجینگ

کریجینگ روشی است که در کنار برآورد مقدار متغیر، میزان خطای مرتبط با هر تخمین را نیز محاسبه می‌کند. فرایند پیش‌بینی در این روش بر مبنای تحلیل ساختار مکانی و جست‌وجوی همسایگی بهینه نقاط انجام می‌شود. (Yigini and Panagos, 2016) کریجینگ معمولی (OK) یکی از روش‌های پیشرفته زمین‌آماري است که بر پایه‌ی مدل‌سازی ساختار واربوگرام عمل می‌کند. این روش یک تخمین گر میانگین متحرک وزن‌دار محسوب می‌شود که وزن‌ها را بر اساس وابستگی مکانی نقاط تعیین می‌کند و به همین دلیل نسبت به بسیاری از روش‌های درون‌یابی از دقت بالاتری برخوردار است. همچنین روش کریجینگ بهترین تخمین گر خطی نارایب به شمار می‌رود. اجرای روش کریجینگ معمولی در محیط نرم افزار Arc GIS (نسخه 10.6.1) و ابزار تخصصی تجزیه و تحلیل زمین‌آماري^{۱۷} انجام شد.

ارزیابی عملکرد مدل‌های پیش‌بینی کننده SFI

ارزیابی کارایی مدل‌های پیش‌بینی کننده مکانی مورد استفاده، با استفاده از چهار شاخص آماری ضریب تبیین (R^2)، ضریب همبستگی تطابق (CCC)^{۱۸}، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)^{۱۹} و میانگین مطلق خطا (MAE^{20}) محاسبه شد (روابط ۵، ۶، ۷، ۸).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Pi - \bar{O}i)}{\sum_{i=1}^n (Oi - \bar{O}i)} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$CCC = \frac{2r\sigma_{Pi}\sigma_{Oi}}{\sigma_{Pi}^2 + \sigma_{Oi}^2 + (\bar{Pi} - \bar{O}i)^2} \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Oi - Pi)^2} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{O}i - \bar{P}i) \quad \text{رابطه (۸)}$$

که در معادلات بالا Pi و Oi مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده هستند، \bar{O} میانگین مقادیر مشاهده شده نسبت به اندازه‌گیری‌های n ، r ضریب همبستگی بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده، و σ_P^2 ، σ_O^2 انحراف معیار مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده است.

متغیرهای کمکی استفاده می‌نماید (Keskin et al., 2019). جزئیات بیشتر در مورد رویکرد انتخاب متغیر VIF و باروتا در مطالعه (Akinwande et al., 2015) ارائه شده است.

مدل‌سازی مکانی

در این پژوهش برای پیش‌بینی مکانی شاخص حاصلخیزی خاک برای کشت محصول گندم، از دو مدل یادگیری ماشین جنگل تصادفی^{۱۴} (RF) و کوبیست^{۱۵} (CB) و مدل درون-یابی کریجینگ معمولی^{۱۶} (OK) استفاده شد.

مدل جنگل تصادفی

در این مطالعه از مدل جنگل تصادفی به عنوان یکی از روش‌های پیش‌بینی مکانی تغییرات شاخص حاصلخیزی خاک استفاده شد. از نمونه بوت استرپ برای هر درخت RF استفاده می‌شود. قوانین تقسیم داده‌های باینری برای رگرسیون و طبقه بندی متفاوت است. برای طبقه‌بندی، از شاخص جینی و برای رگرسیون از حداقل مربعات انحرافات متوسط استفاده می‌گردد. مدل RF در بسته نرم افزاری caret در محیط R قابل اجرا است (Kuhn, 2008).

مدل کوبیست

این مدل یک الگوریتم پیشرفته از روش درخت رگرسیون است که مدل‌های مختلفی را از داده‌های آموزشی ایجاد می‌کند. این مدل یک تکنیک داده‌کاوی است که مجموعه‌ای از درختان رگرسیون را می‌سازد و بر اساس رگرسیون‌های خطی (Ma et al., 2017) پیش‌بینی می‌کند. کوبیست مجموعه داده آموزشی را با تعریف مجموعه‌ای از قوانین تقسیم‌بندی می‌کند و برای هر ویژگی که با یک قانون خاص مطابقت می‌کند، مدل خطی مرتبط برای پیش‌بینی نتیجه ایجاد می‌کند. مدل CB مدل‌های چند متغیره‌ای را ارائه می‌دهد که از مجموعه‌ای از قوانین تشکیل شده‌است. هنگامی که همه قوانین برآورده می‌شوند و فرمول رگرسیون مشتق شده در هر قانون متغیر هدف را پیش‌بینی می‌کند (Appelhans et al., 2015). این مدل دارای قابلیت ارائه اهمیت نسبی متغیرهای کمکی مورد استفاده در پیش‌بینی متغیر هدف می‌باشد و فرایند برازش مدل CB بر روی مجموعه داده‌های موجود با استفاده از بسته تخصصی "cubist" (Kuhn, 2018) در نرم افزار R (نسخه 2.4.1) انجام شد.

¹⁸ Concordance correlation coefficient

¹⁹ Root mean square error

²⁰ Mean absolute error

¹⁴ Random forest

¹⁵ Cubist

¹⁶ Ordinary Kriging

¹⁷ Geostatistical analysis

نتایج و بحث

تجزیه و تحلیل آماری ویژگی‌های حاصلخیزی خاک منطقه ولیعصر بدره و میمه دهلران

نتایج خلاصه آماری ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک منطقه ولیعصر بدره در (جدول ۳) ارائه شده است کمترین و بیشترین میزان مس (Cu) در نمونه‌های خاک به ترتیب ۰/۰۷ و ۱/۲۴ میلی گرم بر کیلوگرم و میانگین آن در تمام نمونه‌ها ۰/۵۸ میلی‌گرم در کیلوگرم است. کمترین میزان آهن (Fe) و روی (Zn) به ترتیب ۱/۵ و ۰/۰۲ و بیشترین آن‌ها برابر با ۵/۸۳ و ۰/۶۸ میلی-گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد و میانگین Zn و Fe به ترتیب برابر با ۳/۵۸ و ۰/۱۸ میلی‌گرم در کیلوگرم است. منگنز (Mn) با میانگین ۵/۲۹ میلی‌گرم در کیلوگرم نسبت به سایر عناصر ریزمغذی دارای مقدار بیشتری در خاک‌های مطالعاتی است (جدول ۳). به علاوه حداقل و حداکثر مقدار Mn به ترتیب برابر با ۲/۵۶ و ۱۰/۸۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد. ضریب تغییرات (CV) به عنوان معیاری برای تفسیر تغییرپذیری داده‌ها بر اساس طبقه‌بندی ارائه شده توسط Wilding (۱۹۸۵) استفاده شد. بر این اساس Zn و Cu دارای تغییرپذیری زیاد (بیش از ۳۵ درصد)، Fe و Mn دارای تغییرپذیری متوسط (بین ۱۵ تا ۳۵ درصد) است. در همین راستا، Vasu و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از مدل‌سازی آماری و تجزیه و تحلیل‌های ژئواستاتستیک، تغییرپذیری مکانی میکرومغذی‌های خاک را در یک منطقه نیمه‌خشک در هند بررسی کردند. نتایج نشان داد که Zn بیشترین تغییرپذیری را دارند که بخشی زیادی از این تغییر پذیری ناشی از مدیریت‌های متنوع ماده آلی و تنوع کودهای مصرفی به خصوص کودهای حاوی روی توسط کشاورزان پیشرو منطقه مورد مطالعه در جهت جبران کاهش عملکرد ناشی از تسطیح‌های خاک سطحی در سالیان اخیر عنوان نمود. خاک اراضی منطقه مطالعاتی شهرک ولیعصر جزو خاک‌های غیر شور (میانگین EC برابر با ۱/۴۳ ds/m) می‌باشد. همچنین مقدار متوسط ماده آلی ۱/۴۳ درصد می‌باشد که بر اساس طبقه‌بندی Charman and Roper., 2000) خاک‌های منطقه از نظر ماده آلی خاک در کلاس محتوای پایین قرار دارند. همچنین مقادیر pH از ۷/۰۶ تا ۸/۲۷ (خنثی تا قلیایی) متغیر بود. مقدار میانگین pH نشان می‌دهد که خاک سطحی خنثی است. با توجه به میانگین SOM (۱/۳۵ درصد) در منطقه دهلران در کلاس محتوای متوسط قرار دارد. همچنین مقادیر ضریب تغییرات نشان‌دهنده تغییرپذیری متوسط EC و زیاد SOM و تغییرپذیری کم pH خاک منطقه مورد مطالعه است. در نهایت مقادیر کمی SFI در منطقه دهلران بین ۱/۳۴ تا ۱۹/۴۲ متغیر بود. شاخص حاصلخیزی منطقه دهلران نیز با ضریب تغییرات ۴۸ درصد دارای تغییرپذیری زیاد است. این میزان تنوع را می‌توان به تفاوت در ویژگی‌های خاک که حاصل مدیریت‌های مختلف اراضی است نسبت داد؛ افزون بر این، شدت تغییرات مشاهده‌شده ممکن است ناشی از الگوهای کوددهی کشاورزان یا شرایط توپوگرافی منطقه باشد (Song et al., 2017). به طور مشابه، چندین مطالعه گزارش کردند که تغییر کاربری اراضی و تبدیل اکوسیستم‌های طبیعی به اراضی زراعی، خواص خاک را به شدت تغییر داده‌است (Bakhshandeh et al., 2017; Zeraatpisheh et al., 2020; Ayoubi et al., 2021).

تسطیح بیش از حد خاک سطحی تعدیل شده است. تغییر پذیری پایین pH ناشی از ظرفیت بالای بافری خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک است. شاخص SFI در منطقه ولیعصر بدره بین ۰/۱۶ تا ۳۶/۵۱ متغیر بود. ضریب تغییرات شاخص SFI برابر ۶۹٪ حاصل گردید که نشان دهنده تغییرپذیری بالای این فاکتور مدیریتی در خاک‌های منطقه است که عمدتاً ناشی از تفاوت در نوع مدیریت و محتوای ویژگی‌های مؤثر بر وضعیت حاصلخیزی خاک‌های منطقه است (jahandideh et al., 2017).

میانگین عناصر ریز مغذی شامل Zn و Fe، Mn، Cu در خاک‌های اراضی میمه دهلران به ترتیب برابر با ۵/۹۷، ۲/۲۳ و ۰/۴۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد. با توجه به حدود بحرانی این عناصر در خاک (به ترتیب برای Fe، Mn، Cu و Zn برابر با ۱، ۸، ۱۰ و ۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) منطقه مطالعاتی از نظر عناصر ریزمغذی دارای کمبود می‌باشد (جدول ۳).

کمترین و بیشترین مقدار EC به ترتیب ۰/۹۹ تا ۶/۳۸ دسی‌زیمنس بر متر اندازه‌گیری شد؛ بنابراین خاک‌های منطقه دهلران از نظر شوری دارای دامنه‌ای از خاک‌های غیر شور تا شوری متوسط با میانگین EC برابر با ۳/۷۴ دسی‌زیمنس بر متر می‌باشد. با این حال با توجه به ضریب تغییرات (به ترتیب برای Cu، Mn، Fe و Zn برابر با ۴۲، ۴۳، ۳۳ و ۴۹ درصد) عناصر ریزمغذی در منطقه مورد مطالعه دارای تغییرپذیری زیاد می‌باشند. مقدار ماده‌آلی از ۰/۲ تا ۲/۶۹ درصد در خاک سطحی متغیر بوده و تغییرپذیری آن زیاد (CV=41) می‌باشد (Wilding, 1985). همچنین مقادیر pH از ۶/۷۹ تا ۷/۹۲ (خنثی تا نسبتاً قلیایی) متغیر بود. مقدار میانگین pH (۷/۲۶) نشان می‌دهد که خاک سطحی خنثی است. با توجه به میانگین SOM (۱/۳۵ درصد) در منطقه دهلران در کلاس محتوای متوسط قرار دارد. همچنین مقادیر ضریب تغییرات نشان‌دهنده تغییرپذیری متوسط EC و زیاد SOM و تغییرپذیری کم pH خاک منطقه مورد مطالعه است. در نهایت مقادیر کمی SFI در منطقه دهلران بین ۱/۳۴ تا ۱۹/۴۲ متغیر بود. شاخص حاصلخیزی منطقه دهلران نیز با ضریب تغییرات ۴۸ درصد دارای تغییرپذیری زیاد است. این میزان تنوع را می‌توان به تفاوت در ویژگی‌های خاک که حاصل مدیریت‌های مختلف اراضی است نسبت داد؛ افزون بر این، شدت تغییرات مشاهده‌شده ممکن است ناشی از الگوهای کوددهی کشاورزان یا شرایط توپوگرافی منطقه باشد (Song et al., 2017). به طور مشابه، چندین مطالعه گزارش کردند که تغییر کاربری اراضی و تبدیل اکوسیستم‌های طبیعی به اراضی زراعی، خواص خاک را به شدت تغییر داده‌است (Bakhshandeh et al., 2017; Zeraatpisheh et al., 2020; Ayoubi et al., 2021).

جدول ۳- خلاصه آماری ویژگی‌های حاصلخیزی خاک و SFI در منطقه ولیعصر بدره و میمه دهلران
 Table 3. Statistical Summary of Soil Fertility Characteristics in the Valiasr-Badreh and Maimeh-Dehloran Area

| متغیر Variable | واحد Unit | حداقل Min | حداکثر Max | میانگین Mean | انحراف معیار SD | ضریب تغییرات CV% |
|--------------------|---------------------|--------------|---------------|-----------------|--------------------|------------------------|
| ولیعصر-بدره | | | | | | |
| Cu | | 0.07 | 1.24 | 0.58 | 0.21 | 36 |
| Mn | | 2.56 | 10.87 | 5.29 | 1.77 | 33 |
| Fe | میلی‌گرم بر کیلوگرم | 1.50 | 5.83 | 3.58 | 0.88 | 25 |
| Zn | | 0.02 | 0.68 | 0.18 | 0.12 | 66 |
| SOM | % | 0.24 | 3.53 | 1.43 | 0.65 | 45 |
| EC | dS/m | 0.09 | 1.56 | 0.23 | 0.25 | 109 |
| pH | - | 7.06 | 8.27 | 7.66 | 0.28 | 3.65 |
| CaCO ₃ | | 24.25 | 75.25 | 55.22 | 16.25 | 29.43 |
| SFI | - | 0.16 | 36.51 | 9.64 | 6.66 | 69 |
| میمه-دهلران | | | | | | |
| Cu | | 0.08 | 1.16 | 0.53 | 0.22 | 42 |
| Mn | | 0.33 | 15.76 | 5.97 | 2.57 | 43 |
| Fe | میلی‌گرم بر کیلوگرم | 0 | 5.25 | 2.23 | 0.74 | 33 |
| Zn | | 0.17 | 1.81 | 0.47 | 0.23 | 49 |
| SOM | % | 0.20 | 2.69 | 1.35 | 0.56 | 41 |
| EC | dS/m | 0.99 | 6.38 | 3.74 | 0.78 | 21 |
| pH | - | 6.79 | 7.92 | 7.26 | 0.23 | 3 |
| CaCO ₃ | | 18.23 | 58 | 43.9 | 9.6 | 21.60 |
| SFI | - | 1.34 | 19.42 | 8.5 | 4.05 | 48 |

=SFI، =Cu مس، =Mn منگنز، =Fe آهن، =Zn روی، =SOM ماده آلی خاک، =EC هدایت الکتریکی، =pH واکنش خاک، =SFI شاخص حاصلخیزی خاک.

و RS انتخاب گردید (جدول ۴) و در نهایت ۹ متغیر محیطی با استفاده از روش باروتا (شکل ۲ ب) به همراه دو متغیر میانگین بارش سالانه و میانگین دما سالانه به عنوان پیش‌بینی‌کننده‌های محیطی برای استفاده در فرآیند مدل‌سازی انتخاب شد.

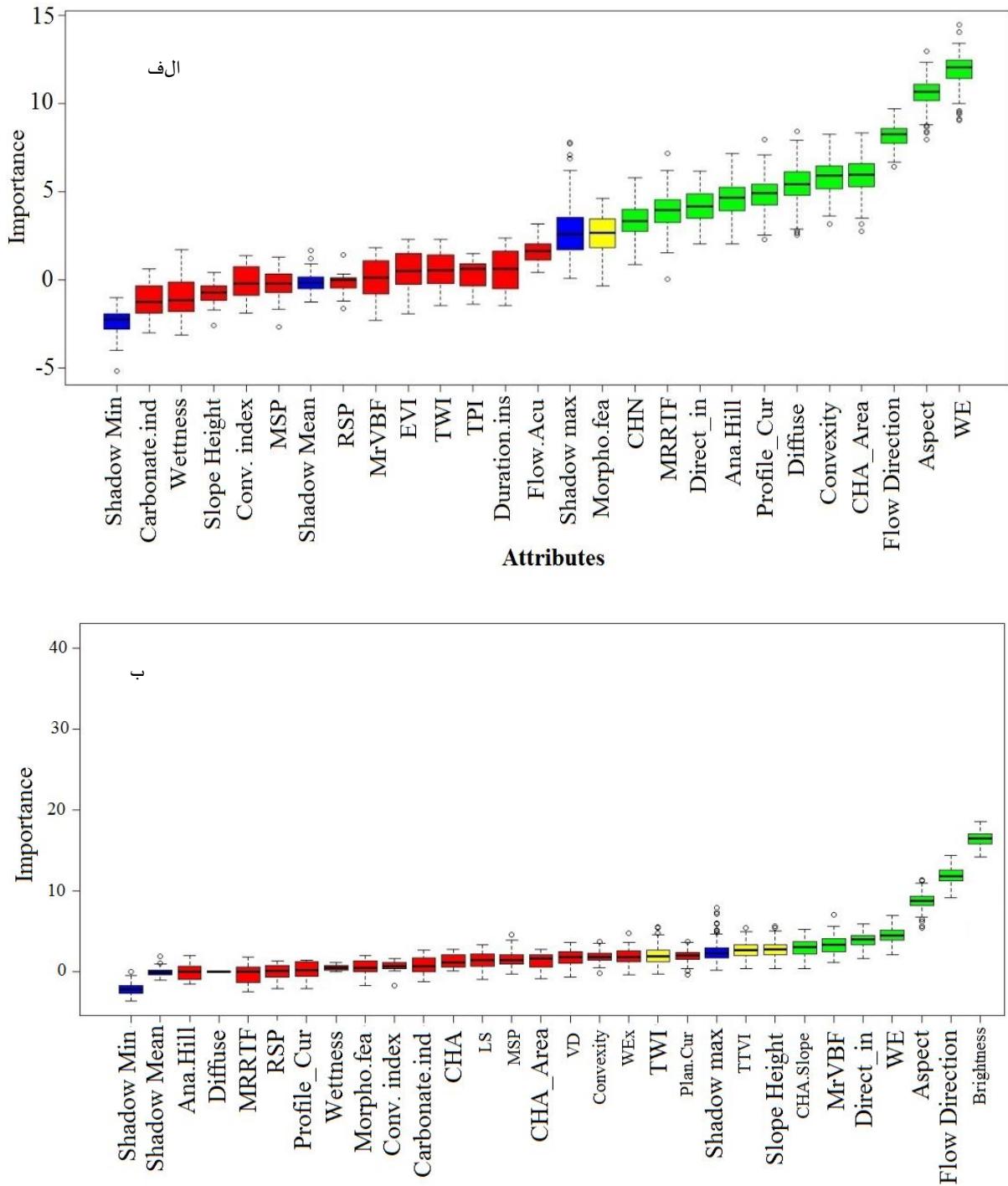
متغیرهای محیطی منتخب منطقه ولیعصر بدره و میمه دهلران

برای مدل‌سازی تغییرات شاخص حاصلخیزی خاک در نقشه‌برداری رقومی، علاوه بر داده‌های مشاهداتی نیاز به داده‌های کمکی مشتق شده از مدل رقومی ارتفاع و تصاویر ماهواره‌ای نیز می‌باشد. برای این منظور ۳۹ متغیر توپوگرافی و ۱۵ متغیر سنجش از دور (RS) استخراج گردید. از ۵۴ متغیر محیطی، ۲۳ متغیر بر اساس VIF در گام اول انتخاب شد (جدول ۴) و در نهایت با استفاده از روش انتخاب متغیر نظارت شده Boruta، ۱۲ متغیر محیطی برای مدل‌سازی انتخاب گردید (شکل ۲ الف). در همین راستا دو متغیر اقلیمی میانگین بارش سالانه و میانگین دما سالانه بر اساس نظر کارشناس نیز به متغیرهای پیش‌بینی‌کننده اضافه گردید در منطقه میمه دهلران بر اساس روش VIF، ۲۷ متغیر از ۵۰ متغیر محیطی توپوگرافی

جدول ۴- متغیرهای محیطی انتخاب شده توسط روش شاخص تورم واریانس (VIF) در اراضی ولیعصر بدره و میمه دهلران

Table 4 - Selected Environmental Variables Using the Variance Inflation Factor (VIF) Method in the Valiasr-Badreh and Maimeh-Dehloran Area

| VIF | متغیرهای محیطی Environmental variables | VIF | متغیرهای محیطی Environmental variables |
|--------------------|---|------|--|
| ولیعصر بدره | | | |
| 9.13 | Analytical Hillshading | 1.81 | Morphometric Features |
| 4.10 | Topographic position index(TPI) | 4.88 | Multiresolution ridge terrain flatness(MRRTF) |
| 6.81 | Channel Network | 5.44 | Multiresolution valley bottom flatness (MRVBF) |
| 4.45 | Modified Catchments Area | 2.93 | Plan Curvature |
| 5.41 | Wind Effect | 4.83 | Slope Height |
| 4.33 | Convergence Index | 5.69 | Topographic Wetness Index |
| 1.83 | Wetness | 3.70 | Diffuse Insolation |
| 4.45 | Carbonate Index | 5.30 | Direct Insolation |
| 4.72 | Enhanced vegetation index(EVI) | 2.64 | Duration of Insolation |
| 2.32 | Aspect | 3.42 | Flow Accumulation |
| 3.32 | Convexity | 1.61 | Flow Direction |
| | | 2.27 | Mid slope Position |
| میمه دهلران | | | |
| 1.75 | Catchment Area | 3.46 | Relative Slope Position |
| 2.55 | Catchment Slope | 2.11 | Morphometric Features |
| 3.57 | Modified Catchments Area | 2.67 | Multiresolution ridge terrain flatness(MRRTF) |
| 4.89 | Wind Effect | 3.39 | Multiresolution valley bottom flatness (MRVBF) |
| 3.64 | Convergence Index | 3.59 | Plan Curvature |
| 5.18 | Wetness | 2.37 | Slope Height |
| 3.48 | Carbonate Index | 4.23 | Topographic Wetness Index |
| 5.61 | TTVI | 2.69 | Profile Curvature |
| 3.32 | Aspect | 5.04 | Direct Insolation |
| 1.96 | Convexity | 1.99 | Duration of Insolation |
| 5.34 | Valley Depth | 2.38 | LS Factor |
| 7.22 | Brightness | 3.06 | Flow Direction |
| 7.85 | Wind Exposion | 6 | Mid slope Position |
| | | 6.06 | Analytical Hillshading |



شکل ۲- متغیرهای محیطی منتخب به روش Brouta برای منطقه الف- ولیعصر بدره ب- میمه دهلران. (عناوین کامل متغیرهای محیطی ارجاع به جدول)

Figure 2. Selected Environmental Variables Using the Brouta Method for (a) the Valiasr-Badreh (b) Maimeh-Dehloran Areas. (Full names of environmental variables referenced in Table 4)

محیطی برای استفاده در فرآیند مدل‌سازی شاخص SFI انتخاب شد. (جدول ۵).

در مجموع در ولیعصر بدره ۱۴ متغیر محیطی و در میمه دهلران ۱۱ متغیر به عنوان مناسب‌ترین پیش‌بینی‌کننده‌های

جدول ۵- متغیرهای محیطی انتخاب شده برای مدل‌سازی شاخص حاصلخیزی خاک منطقه ولیعصر بدره و میمه دهلران

Table 5. Selected Environmental Variables for Modeling Soil Fertility Index in the Valiasr-Badreh and Maymeh-Dehloran Areas

| واحد (Units) | نماد Symbol | ماهیت متغیر Source of variable | نام متغیر Variable | متغیرهای محیطی Environmental variables |
|--------------------|----------------|--------------------------------------|------------------------------------|--|
| ولیعصر بدره | | | | |
| - | Morpho_fea | توپوگرافی | ویژگی مورفومتری | Morphometric Features |
| - | MRRTF | توپوگرافی | شاخص همواری قله با درجه تفکیک بالا | Multi resolution Ridge Top Flatness(MRRTF) |
| Kw.m ⁻² | Diffuse | توپوگرافی | شدت تابش پخشیده | Diffuse Insolation |
| - | Flow Direction | توپوگرافی | جهت جریان | Flow Direction |
| Kw.m ⁻² | Direct_in | توپوگرافی | تابش مستقیم | Direct Insolation |
| - | Ana_Hill | توپوگرافی | تجزیه و تحلیل سایه اندازی تپه‌ها | Analytical Hillshading |
| meters | CHN | توپوگرافی | سطح پایه شبکه آبراهه | Channel Network Base Level |
| m ² | CHA_Area | توپوگرافی | مساحت حوزه زهکشی اصلاح شده | Catchment Area |
| - | WE | توپوگرافی | اثر باد | Wind Effect |
| Degree | Aspect | توپوگرافی | جهت شیب | Aspect |
| - | Convexity | توپوگرافی | تحدب شیب | Convexity |
| °C | MAT | اقلیم | میانگین دمای سالیانه | Mean Annual Temperature |
| mm | MAP | اقلیم | میانگین بارش سالیانه | Mean Annual Precipitation |
| 1/meters | Profile_Cur | توپوگرافی | انحنای نیمرخ | Profile Curvature |
| میمه دهلران | | | | |
| - | MrVBF | توپوگرافی | شاخص همواری دره با درجه تفکیک بالا | Multi Resolution Index of Valley Bottom Flatness |
| - | Slope Height | توپوگرافی | ارتفاع شیبدار | Slope Height |
| Kw.m ⁻² | Direct_in | توپوگرافی | شدت تابش مستقیم | Direct Insolation |
| - | Flow Direction | توپوگرافی | جهت جریان | Flow Direction |
| - | CHA_Slope | توپوگرافی | شیب حوزه | Catchment Slope |
| - | WE | توپوگرافی | شاخص اثر باد | Wind Effect |
| - | TTVI | سنجش از دور | شاخص پوشش گیاهی تعدیل یافته تایمز | Thiam's Transformed Vegetation Index |
| Degree | Aspect | توپوگرافی | جهت شیب | Aspect |
| - | Brightness | سنجش از دور | شاخص روشنایی | Brightness |
| °C | MAT | اقلیم | میانگین دمای سالیانه | Mean Annual Temperature |
| mm | MAP | اقلیم | میانگین بارش سالیانه | Mean Annual Precipitation |

مقایسه عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین و زمین

آمار

تمام نقشه‌های پیش‌بینی مکانی با استفاده از روش ۱۰ گام آموزش و ۵ تکرار تهیه گردید. در اراضی مطالعاتی ولیعصر بدره، میزان R^2 برای RF برابر با ۰/۶ و برای CB برابر با ۰/۳۳ به دست آمد. با توجه به Rossel and McBratney (۲۰۰۸)، مدل CB با R^2 کمتر از ۰/۴ پیش‌بینی ضعیف برای شاخص حاصلخیزی خاک در منطقه بدره ارائه نمود. میزان RMSE برای دو مدل RF و CB به ترتیب برابر با ۰/۶۹ و ۱/۰۶ محاسبه شد. مقدار MAE برای هر دو مدل RF و CB به ترتیب برابر با ۰/۳۶ و ۰/۹۸ به دست آمد. همچنین نتایج نشان داد که ضریب همبستگی تطابق برای مدل RF، ۳۷ درصد بیشتر از مدل CB است. همچنین مدل OK با مقادیر R^2 ، CCC، RMSE و MAE به ترتیب برابر با ۰/۰۲، ۰/۰۱۲، ۰/۰۲ و ۵/۳۷ دارای عملکردی بسیار ضعیف نسبت به مدل‌های یادگیری ماشین است (جدول ۶). در همین راستا، مطالعاتی که توسط Zaheri abdevand و همکاران (۲۰۲۵) و همچنین Meymand RF و همکاران (۲۰۲۳) انجام گردید، گزارش کردند که مدل RF نسبت به دیگر مدل‌های یادگیری ماشین کارایی بالاتری در پیش‌بینی SFI در دشت‌های هنام و خوزستان داشت؛ زیرا این مدل توانایی آن را دارد که بتواند روابط غیرخطی بین متغیرهای محیطی و ویژگی‌های خاک را به خوبی در حین فرآیند مدل‌سازی و پیش‌بینی لحاظ نماید (Azizi et al., 2023). علاوه بر این Parsaei و همکاران نیز (۲۰۲۱) بر توانایی بالای مدل RF در مقایسه با مدل‌های رگرسیون CB و درخت تصمیم در پیش‌بینی TN سطح خاک در منطقه کردستان ایران تأکید کردند. به طور کلی مطالعات متعددی در رابطه با کارکرد بالای این مدل در

رابطه با ویژگی‌های خاک سطحی گزارش شده است. از جمله می‌توان به مطالعات Nussbaum و همکاران (۲۰۱۸) اشاره کرد که آن‌ها روش‌های مختلف را برای نقشه‌برداری چندین ویژگی خاک در سه منطقه‌ی مطالعاتی در سوئیس تجزیه و تحلیل کردند و دریافتند که مدل RF بهترین عملکرد را داشته است. عملکرد مدل‌های RF و CB برای پیش‌بینی شاخص حاصلخیزی در اراضی مطالعاتی دهلران در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج نشان داد که R^2 و RMSE برای مدل RF برابر با ۰/۷۹ و ۰/۶۴ و برای مدل CB برابر با ۰/۳۴ و ۰/۸۴ می‌باشد. همچنین شاخص MAE و CCC برای RF برابر با ۰/۳۷ و ۰/۷۵ و برای CB برابر با ۰/۶۲ و ۰/۳۹ می‌باشد. همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد مدل RF پیش‌بینی خوب و مدل CB پیش‌بینی ضعیفی را در فرآیند مدل‌سازی داشت که با نتایج مدل‌سازی SFI در اراضی منطقه ولیعصر بدره همسو است. نتایج اعتبارسنجی مدل OK با مقادیر R^2 ، CCC، RMSE و MAE به ترتیب برابر با ۰/۴۹، ۰/۳۲، ۳/۹ و ۳/۲ بدست آمد. مدل OK نسبت به مدل CB نتایج بهتری ارائه نمود، اگر چه نسبت به مدل RF دارای دقت کمتری ارائه نمود. Matinfar و همکاران (۲۰۲۱) در مقایسه کارایی چهار مدل یادگیری ماشین (RF، QRF، CB و PLSR) با رویکرد فازی در پیش‌بینی کربن آلی خاک به‌عنوان یکی از عوامل تأثیرگذار بر حاصلخیزی خاک گزارش نمودند که مدل RF در تلفیق با داده‌های توپوگرافی و سنجش از دور کارایی بیشتری را نسبت به دیگر مدل‌های یادگیری ماشین مورد استفاده ارائه نموده است. در همین راستا نتایج مشابهی توسط (Zaheri et al., 2024; Mousavi et al., 2025) نیز کارایی بالای مدل RF را در مطالعات نقشه‌برداری رقومی ویژگی‌های حاصلخیزی خاک گزارش شده است.

جدول ۶- عملکرد مدل‌ها RF، CB و OK برای پیش‌بینی شاخص حاصلخیزی خاک در منطقه ولیعصر بدره و میمه

دهلران

Table 6 - Performance of the RF, CB, and OK models for predicting SFI in the Valiasr-Badreh and Maimeh-Dehloran Areas

| مدل | R^2 | RMSE | MAE | CCC |
|-------------|-------|------|------|------|
| ولیعصر بدره | | | | |
| RF | 0.60 | 0.69 | 0.36 | 0.64 |
| CB | 0.33 | 1.06 | 0.98 | 0.27 |
| OK | 0.02 | 7.02 | 5.37 | 0.01 |
| میمه دهلران | | | | |
| RF | 0.79 | 0.64 | 0.37 | 0.75 |
| CB | 0.34 | 0.84 | 0.62 | 0.39 |
| OK | 0.49 | 3.9 | 3.2 | 0.32 |

نقشه حاصلخیزی خاک منطقه ولیعصر بدره و میمه

دهلران

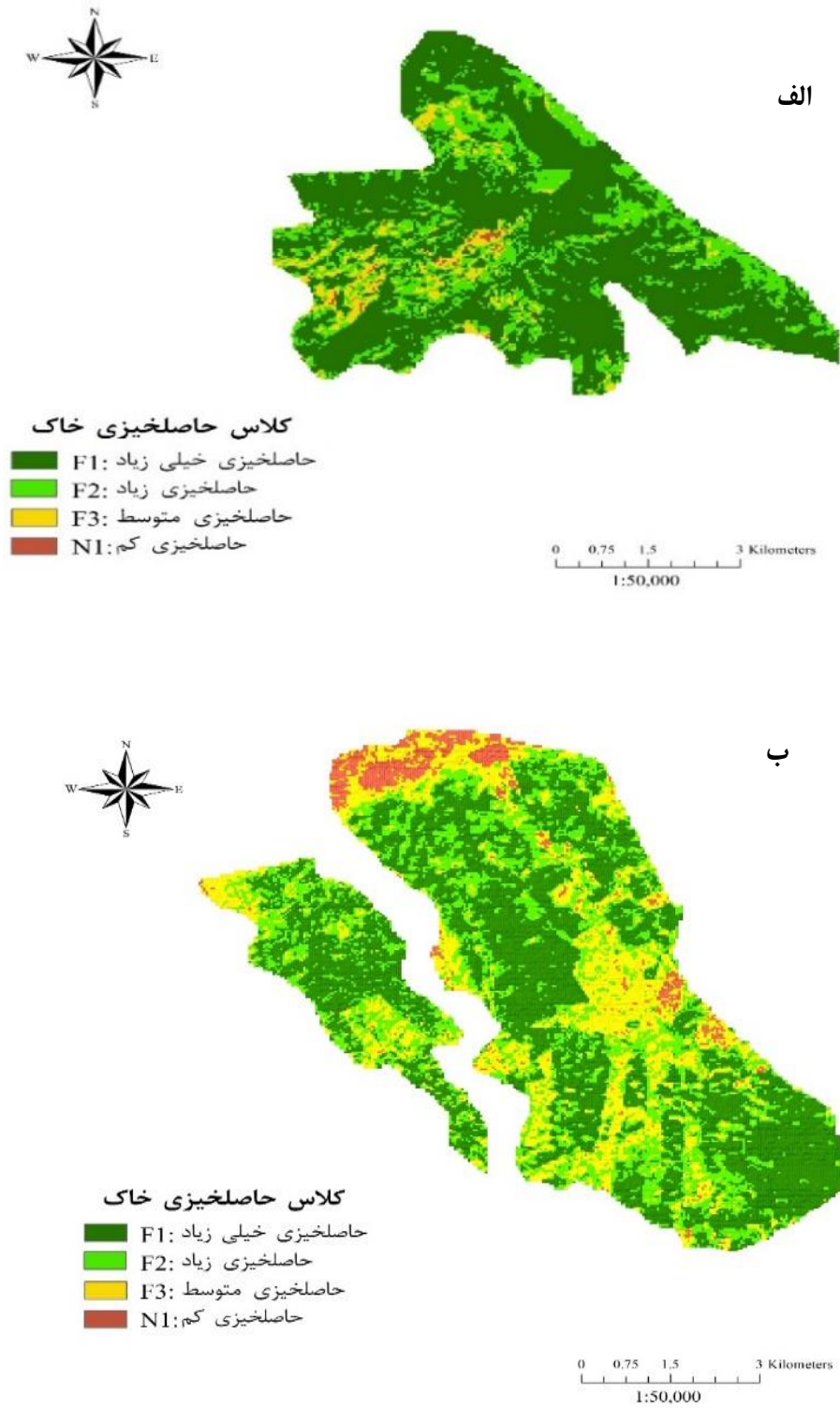
تهیه نقشه حاصلخیزی به شناسایی زمینه‌های کمبود عناصر مغذی برای تهیه برنامه اقدام‌های مدیریتی، کمک می‌کند (Nabavi et al., 2022). بر اساس نتایج جدول ۷ حاصلخیزی خاک منطقه ولیعصر بدره به چهار کلاس استاندارد حاصلخیزی کم (N1) حاصلخیزی متوسط (F3)، حاصلخیزی زیاد (F2) و حاصلخیزی خیلی زیاد (F1) طبقه‌بندی شد. کلاس F1 با ۵۲/۸۶ درصد بیشترین و کلاس N1 با ۳/۰۴ درصد کمترین درصد از مساحت کل منطقه را شامل می‌شوند. همچنین ۲۴/۴۷ و ۱۶/۶۲ درصد از منطقه نیز به ترتیب در کلاس F3 و F2 قرار دارند. در مجموع ۷۷/۳۳ درصد از منطقه ولیعصر بدره دارای حاصلخیزی زیاد و خیلی زیاد برای کشت گندم می‌باشد. الگوی مکانی وضعیت بالقوه حاصلخیزی خاک بر اساس مدل RF در (شکل ۴) نشان داده شده است. (شکل ۳ الف). به طور کلی این نقشه‌ها روند توزیعی مشابهی از حاصلخیزی خاک را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهند. به طور خاص حاصلخیزی خاک بالا در شرق، شمال و جنوب منطقه مشاهده می‌شود. در مقابل حاصلخیزی خاک پایین‌تر در مرکز و غرب منطقه متمرکز شده‌اند. نتایج ارائه شده در (جدول ۷) برای میمه دهلران نشان می‌دهد که ۱۳۸۷/۷۷

هکتار از کل اراضی دارای حاصلخیزی خیلی زیاد، ۹۰۶/۳ هکتار زیاد، ۶۸۷/۴۷ هکتار متوسط و ۱۱۲/۷۲ هکتار کم هستند. در نتیجه ۷۴/۱۴ درصد از اراضی مطالعاتی دارای حاصلخیزی زیاد و خیلی زیاد و ۳/۶۳ درصد دارای حاصلخیزی کم است. پراکنش مکانی وضعیت حاصلخیزی خاک منطقه دهلران بر اساس مدل RF در (شکل ۳ ب) نشان داده شده است. به طور کلی شمال و مرکز منطقه مطالعاتی دارای حاصلخیزی کم و سایر مناطق دارای حاصلخیزی زیاد برای کشت گندم است. در اراضی ولیعصر بدره در نواحی با حاصلخیزی کم، میزان قابل دسترس Zn بر اساس جدول ۱ در وضعیت خیلی کم و مقدار Fe کم است، این عناصر به علت کاهش حلالیت ناشی از میزان بالای آهک در افق سطحی (میانگین ۵۵ درصد) در وضعیت مناسبی از نظر قابلیت دسترسی قرار ندارند. سایر ویژگی‌های مؤثر بر حاصلخیزی خاک در وضعیت متوسط قرار دارند، بنابراین عناصر ریزمغذی Zn و Fe اصلی‌ترین عوامل در میزان پایین شاخص حاصلخیزی در این اراضی می‌باشند. در اراضی میمه دهلران نیز دو عنصر غذایی Zn و Fe از ویژگی‌های مؤثر بر کاهش کلاس حاصلخیزی می‌باشند و شدت محدودکننده بودن Fe بیشتر از Zn است. همچنین از عوامل کاهش قابلیت دسترسی عناصر غذایی در این دشت میمه دهلران می‌توان به میزان بالای درصد آهک افق سطحی خاک‌ها (میانگین ۴۳ درصد) اشاره نمود.

جدول ۷- مساحت کلاس‌های حاصلخیزی منطقه ولیعصر بدره و میمه دهلران

Table 7. Area of the predicted SFI classes by the RF in the Valiasr-Badreh and Maymeh-Dehloran Area

| مدل RF | | |
|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| درصد مساحت Percentage of area | مساحت (هکتار) Area (hectares) | کلاس حاصلخیزی Fertility class |
| ولیعصر بدره | | |
| 52.86 | 967.79 | حاصلخیزی خیلی زیاد (F1) |
| 24.47 | 448.007 | حاصلخیزی زیاد (F2) |
| 19.62 | 359.2 | حاصلخیزی متوسط (F3) |
| 3.04 | 55.7 | حاصلخیزی کم (N1) |
| میمه دهلران | | |
| 44.85 | 1387.77 | حاصلخیزی خیلی زیاد (F1) |
| 29.29 | 906.3 | حاصلخیزی زیاد (F2) |
| 22.22 | 687.47 | حاصلخیزی متوسط (F3) |
| 3.63 | 112.72 | حاصلخیزی کم (N1) |

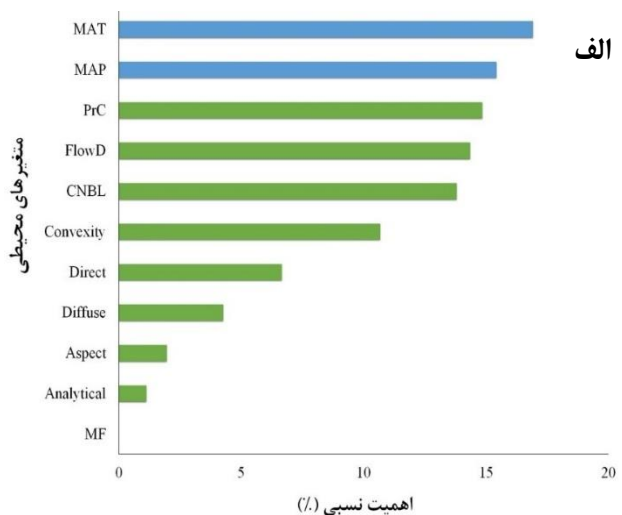
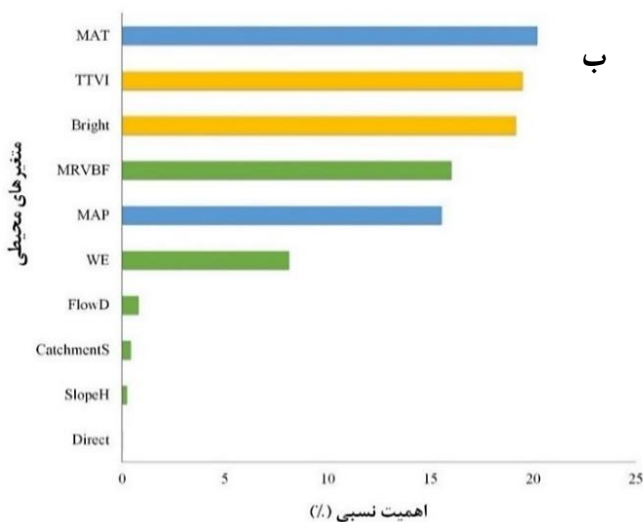


شکل ۳- نقشه پراکنش مکانی شاخص SFI در منطقه الف)- ولیعصر بدره ب)- میمه دهلران با استفاده از مدل RF
Fig 4. Spatial Distribution Map of SFI in (a)Valiasr-e-Badreh and (b) Maimeh-Dehloran Area using RF Model

همکاران (2020a) بیان داشتند که فاکتور اقلیمی میانگین دمای سالانه به همراه ویژگی‌های خاک (درصد رس، آهک، جرم مخصوص ظاهری) مهم‌ترین متغیرهای مؤثر در حاصلخیزی خاک از جمله مواد آلی خاک هستند و به دنبال آن متغیرهای توپوگرافی در درجه دوم اهمیت در این پیش‌بینی قرار می‌گیرد. در این راستا Amirian Chekan و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که متغیرهای توپوگرافی با تأثیر بر فرآیندهای فرسایش و رسوب نقش مهمی را در پایداری و ذخیره‌سازی کربن آلی در خاک دارند و از این رو می‌توانند اثر مثبتی بر حاصلخیزی خاک داشته باشند. در میمه دهلران، متغیر محیطی اقلیمی MAT با ۲۰/۲۱ درصد، متغیر سنجش از دور TTVI با ۱۹/۴۸ درصد و Brightness با ۱۹/۱۵ درصد در بین متغیرها بیشترین تأثیر را داشتند و متغیرهای توپوگرافی از اهمیت کمتری نسبت به سایر متغیرها برخوردار بودند (شکل ۴ ب). در پژوهشی گزارش شده است که شاخص‌های پوشش گیاهی و انعکاس سنجش از دور از عوامل کلیدی برای پیش‌بینی ویژگی‌های به شمار می‌روند (Yang et al., 2016).

اهمیت نسبی متغیرهای محیطی منطقه ولیعصر بدره و میمه دهلران

اهمیت نسبی متغیرهای مورد استفاده در فرآیند مدل سازی SFI بر اساس شاخص اهمیت نسبی حاصل از مدل RF در (شکل ۴) ارائه شده است. در منطقه بدره شکل ۴ الف، دو متغیر اقلیمی MAT و MAP به ترتیب با ۱۶/۹ و ۱۵/۴ درصد مهم ترین متغیر پیش‌بینی کننده توزیع SFI توسط مدل RF می‌باشند. پس از متغیرهای اقلیمی، متغیرهای FlowD, PrC و CNBL اهمیت بیشتری در مدل سازی داشتند. نتایج بیانگر ارتباط مؤثر بارش با شاخص حاصلخیزی خاک است، در حالی که تأثیرات دما بسته به سطح بارش متفاوت می‌باشد (Pal and Shurpali., 2006) می‌تواند بر ذخیره‌سازی کربن آلی خاک به عنوان یکی از عوامل مهم در حاصلخیزی خاک از طریق تأثیر بر فتوسنتز گیاهان و تجزیه مواد آلی خاک نقش بسزایی داشته باشد (Zhou et al., 2021). در مطالعه‌ای در دشت قزوین Mousavi و



شکل ۴- اهمیت نسبی متغیرهای محیطی انتخاب شده در پیش‌بینی SFI براساس مدل RF در منطقه الف)- ولیعصر بدره ب)- میمه دهلران

Figure 5. Relative importance of selected environmental variables in predicting SFI based on the RF model in the Valiasr-Badreh Maymeh-Dehloran Areas.

ضعیف با Nugget/Sill برابر با ۰/۷۹ دارد. از عوامل پایین بودن میزان ساختار همبستگی شاخص حاصلخیزی خاک در دشت ولیعصر بدره می‌توان به وجود روند شدید داده‌ها ناشی از تغییرات توپوگرافی منطقه نسب به دشت هموار میمه دهلران اشاره نمود.

خودهمبستگی مکانی شاخص حاصلخیزی خاک در دو منطقه

نتایج نیم‌متغیرهای پیش‌بینی مکانی توسط مدل زمین‌آماري OK در (جدول ۸) نشان داده شده است. نسبت Nugget/Sill برای توصیف درجه همبستگی مکانی تغییرات تصادفی شاخص حاصلخیزی خاک استفاده شد. نسبت Nugget/Sill نشان داد که مدل RF برای پیش‌بینی مقدار شاخص حاصلخیزی خاک، همبستگی مکانی متوسط (دامنه ۲۵-۷۵) برای منطقه دهلران و برای بدره همبستگی مکانی

جدول ۸- نیم‌متغیرهای پیش‌بینی مکانی توسط مدل زمین‌آماری OK
Table 13- Spatial prediction semivariates by the OK geostatistical model

| منطقه Area | مدل Model | دامنه تاثیر (متر) Rffective Range(m) | آستانه Sill | نرخ واریانس قطعه/آستانه Nugget/Sill | همبستگی مکانی Spatial autocorrwlation |
|---------------|--------------|--|----------------|---|---|
| بدره | Exponential | 1095.4 | 30.5 | 0.76 | Weak |
| دهلران | Gaussian | 2752.7 | 37.3 | 0.35 | Moderate |

این مجموعه ویژگی‌ها به طور یکپارچه و در شرایط کمبود داده های عناصر ماکرو قادر به ارائه وضعیت کلی حاصلخیزی خاک در اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک خواهند بود.

نتیجه‌گیری

ضریب تغییرات SFI برای هر دو منطقه تغییرپذیری زیاد حاصلخیزی خاک را نشان داد. نتایج حاصل از اعتبارسنجی نشان داد که مدل RF در هر دو منطقه دارای پتانسیل بالا برای پیش‌بینی SFI است. با توجه به نتایج مدل RF و OK در این تحقیق بیش از ۵۰٪ از مساحت هر دو منطقه از نظر حاصلخیزی فاقد محدودیت می‌باشد در اراضی ولیعصر بدره در نواحی با حاصلخیزی کم، میزان قابل دسترس Zn وضعیت خیلی پایین و Fe پایین است و سایر ویژگی‌های مؤثر بر حاصلخیزی خاک در وضعیت متوسط قرار دارند بنابراین عناصر ریزمغذی Zn و Fe اصلی‌ترین عوامل در میزان پایین شاخص حاصلخیزی در این اراضی می‌باشند. در اراضی میمه دهلران نیز دو عنصر غذایی Zn و Fe از ویژگی‌های مؤثر بر کاهش وضعیت حاصلخیزی خاک می‌باشند و شدت محدودکننده بودن Fe بیشتر از Zn است. در این راستا می‌توان از اقدامات مدیریتی توصیه شده برای غلبه بر این محدودیت‌ها مانند مصرف کود کافی و افزایش میزان مواد آلی خاک در جهت ارتقای بهره‌وری تولید گندم در منطقه استفاده کرد.

شناسایی متغیرهای محیطی کلیدی مؤثر بر توزیع مکانی SFI خاک نشان داد که متغیرهای محیطی اقلیمی MAT و MAP توانایی بالایی در پیش‌بینی SFI دارند. همچنین متغیرهای توپوگرافی در منطقه ولیعصر بدره و متغیرهای RS در منطقه دهلران پس از متغیرهای اقلیمی در پیش‌بینی SFI مؤثر بودند. نقشه‌های پیش‌بینی شده SFI، تنوع مکانی بالای از مقادیر این شاخص را نشان داد. طبقه‌بندی SFI نشان داد که عمده اراضی مطالعاتی خاک‌های بدره و دهلران پتانسیل حاصلخیزی بالایی دارند. علاوه بر این، بخش محدودی از خاک‌ها با سطح حاصلخیزی کم در قسمت غرب منطقه بدره و قسمت شمال و مرکز منطقه مطالعاتی دهلران واقع شده است که لازم است این مناطق بر اساس نقشه‌های تهیه شده مدیریت‌های مناسب بر روی آن‌ها اعمال و نسبت به بهبود وضعیت حاصلخیزی آن‌ها اقدام گردد. لحاظ نشدن عناصر ماکروها در مدل ارزیابی حاصلخیزی با توجه به ماهیت وابسته به مدیریت کوتاه‌مدت آن‌ها و تمرکز بر ویژگی‌های پایدار جایگزین شده در این تحقیق بیانگر این است

References



- Adhikari, K., Hartemink, A. E., Minasny, B., Bou Kheir, R., Greve, M. B. and Greve, M. H. 2014. Digital Mapping of Soil Organic Carbon Contents and Stocks in Denmark*. PLOS ONE, 9(8): e105519. DOI: 10.1371/journal.pone.0105519 ([PMC][2]).
- Akinwande M., Dikko H., and Samson A. 2015. Variance Inflation Factor: As a condition for the inclusion of suppressor variable(s) in regression analysis. Open Journal of Statistics 5: 754-767.
- Amirian Chekan, A., Taghizadeh Mehrjerdi, R., Sarmadian, F. and Heidary, A. 2017. Three-dimensional mapping of soil texture using spline depth functions and artificial neural networks. Iranian Journal of Soil and Water Research, 48(1), 113-123.
- Ayoubi, S., Sadeghi, N., Afshar, F.A., Abdi, M.R., Zeraatpisheh, M. and Rodrigo-Comino, J. 2021. Impacts of oak deforestation and rainfed cultivation on soil redistribution processes across hillslopes using 137 Cs techniques. For. Ecosyst. 8, 32.
- Azizi, K., Garosi, Y., Ayoubi, S. and Tajik, S. 2023. Integration of Sentinel-1/2 and topographic attributes to predict the spatial distribution of soil texture fractions in some agricultural soils of western Iran. Soil and Tillage Research, 229, 105681. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105681>.
- Bannai, M. H. 1998. Soil moisture and temperature map. Soil and Water Research Institute of Iran.
- Bakhshandeh, E., Hossieni, M., Zeraatpisheh, M. and Francaviglia, R. 2019. Land use change effects on soil quality and biological fertility: a case study in northern Iran. Eur. J. Soil Biol. 95, 103119. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2019.103119>.
- Charman, P.E.V. and Roper, M.M. 2007. Soil Organic Matter. In: Charman, P.E.V. and Murphy, B.W., Eds., Soils—Their Properties and Management, 3rd Edition, Oxford University Press, Melbourne, 276-285.
- Hag Husein, H., Lucke, B., Bäuml, R. and Sahwan, W. 2021. A contribution to soil fertility assessment for arid and semi-arid lands. Soil Systems, 5(3), p.42.
- Hengl, T., Mendes de Jesus, J., Heuvelink, G. B., Ruiperez Gonzalez, M., Kilibarda, M., Blagotić, A. and Kempen, B. 2017. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. PLoS one, 12(2), e0169748.
- Hobley, E., Wilson, B., Wilkie, A., Gray, J. and Koen, T. 2015. Drivers of soil organic carbon storage and vertical distribution in Eastern Australia. Plant and Soil, 390(1), 111-127.
- Jahandideh mahjan abadi, V. A., karami, A., mousavi, S. R. and Asadi Rahmani, H. 2017. Evaluation of Spatial Variability of Biological Indicators of Soil Quality in Wheat Farms of Pasargad Plain. *Water and Soil*, 31(4), 1247-1259. doi: 10.22067/jsw.v31i4.60472
- Jenny, H. 1994. Factors of soil formation: a system of quantitative pedology. Courier Corporation.
- Karimi, H., Fathizad, H., Taze, M. 2014. Investigation different geostatistical algorithms for zoning annual rainfall in Ilam province. App. Res. J. Geogr.Sci. 14(35).
- Lagacherie, P. 2008. Digital soil mapping: a state of the art. Digital soil mapping with limited data, 3-14.
- Lamichhane, S., Kumar, L. and Wilson, B. 2019. Digital soil mapping algorithms and covariates for soil organic carbon mapping and their implications: A review. Geoderma, 352, 395-413.
- Ma, Z., Shi, Z., Zhou, Y., Xu, J., Yu, W. and Yang, Y. 2017. A spatial data mining algorithm for downscaling TMPA 3B43 V7 data over the Qinghai-Tibet Plateau with the effects of systematic anomalies removed. *Remote Sensing of Environment*, 200, 378-395.
- Meymand, F. E., Ramezanzpour, H., Yaghmaeian, N. and Eftekhari, K. 2023. Spatial modeling of a soil fertility index using digital soil mapping: A case study from the Honam watershed, Iran. Desert, 28(2). Doi: 10.22059/jdesert.2023.95754.
- Matinfar, H. R., Maghsodi, Z., Mousavi, S. R. and Rahmani, A. 2021. Evaluation and Prediction of Topsoil organic carbon using Machine learning and hybrid models at a Field-scale. *catena*, 202, 105258.
- McBratney, A. B., Santos, M. M. and Minasny, B. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma*, 117(1-2), 3-52.

21. Minasny, B., McBratney, A. B., Malone, B. P. and Wheeler, I. 2013. Digital mapping of soil carbon. *Advances in agronomy*, 118, 1-47.
22. Mousavi, S. R., Sarmadian, F., Omid, M. and Bogaert, P. 2022. Application of machine learning models in spatial estimation of soil phosphorus and potassium in some parts of Abyek Plain. *Iranian Journal of Soil Research*, 35(4), 397-411.
23. Moshiri, F. 2013. Guidelines for integrated management of and wheat plant nutrition, *soil and water research institute* (In Persian).
24. Mousavi, S. R., Sarmadian, F., Omid, M. and Bogaert, P. 2022. Three-dimensional mapping of soil organic carbon using soil and environmental covariates in an arid and semi-arid region of Iran. *Measurement*, 201, 111706.
25. Nabavi, S. F., Yaghmaeian Mahabadi, N. and MahmoudSoltani, S. 2021. Assessment of Soil Fertility Using Fuzzy Membership Functions and AHP in Paddy Fields (Case Study: Research Fields Goldasht, Amol). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(1), 109-122. doi: 10.22059/ijswr.2020.308462.668707.
26. Nariyanti, S., Herawati, A., Herdiansyah, G., Irianto, H., Riptanti, E. W. and Qonita, A. 2022. Soil fertility index based on altitude: A comprehensive assessment for the cassava development area in Indonesia. *Annals of Agricultural Sciences*, 67(2), 158-165.
27. Naorem, A., Jayaraman, S., Dang, Y. P., Dalal, R. C., Sinha, N. K., Rao, C. S. and Patra, A. K. 2023. Soil constraints in an arid environment—challenges, prospects, and implications. *Agronomy*, 13(1), 220.
28. Nussbaum, M., Spiess, K., Baltensweiler, A., Grob, U., Keller, A., Greiner, L., Schaepman, M.E. and Papritz, A. 2018. Evaluation of digital soil mapping approaches with large sets of environmental covariates. *Soil* 4, 1–22. <https://doi.org/10.5194/soil-4-1-2018>.
29. Pal, S. S. and Shurpali, N. J. 2006. Variation in soil organic carbon as influenced by climate under different cropping systems in India. *JOURNAL-INDIAN SOCIETY OF SOIL SCIENCE*, 54(3), 294.
30. Parsaie, F., Farrokhan Firouzi, A., Mousavi, S. R., Rahmani, A., Sedri, M. H. and Homaei, M. 2021. Large-scale digital mapping of topsoil total nitrogen using machine learning models and associated uncertainty map. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(4), 162.
31. Peng, Y., Liu, Z., Lin, C., Hu, Y., Zhao, L., Zou, R. and Mao, X. 2022. A New Method for Estimating Soil Fertility Using Extreme Gradient Boosting and a Backpropagation Neural Network. *Remote Sensing*, 14(14), 3311.
32. Rahmani, A., Sarmadian, F. and Arefi, H. 2022. Digital Mapping of Top-soil Thickness and Associated Uncertainty Using Machine Learning Approach in Some Part of Arid and Semi-Arid Lands of Qazvin Plain. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(3), 585-602. doi: 10.22059/ijswr.2022.338007.669195
33. Rossel, R. V. and A. B. McBratney. 2008. Diffuse reflectance spectroscopy as a tool for digital soil mapping. In: 165-172. In: Hartemink, A. (Eds.), *Digital Soil Mapping with Limited Data*, Springer
34. Rostaminia, M., Rahmani, A., Mousavi, S. R., Taghizadeh-Mehrjardi, R. and Maghsodi, Z. 2021. Spatial prediction of soil organic carbon stocks in an arid rangeland using machine learning algorithms. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(12), 815.
35. Shahbazi, K. & Besharati, H. (2013). Overview of agricultural soil fertility status of Iran. **Land Management Journal**, 1(1): 1–15.
36. Shahbazi, K.; Marzi, M.; Mohammadi, M. H.; Asadi, H.; Fathi-Gardelidani, A.; Hashemi-Nasab-Zavareh, K. S.; Tolouei, R.; Beheshti, M.; Avizhgan, I.; Cheraghi, M. (Ed: Mohammadi, Z.). 2024 (1403). *Soil Analysis Methods: Sampling, Chemical and Physical Procedures*. *Soil & Water Research Institute* (SWRI), Karaj, Iran. ISBN: 978-622-6705-36-3. 1,074 pp.
37. Shahriari, M., Delbari, M., Afrasiab, P. and Pahlavan-Rad, M.R. 2019. Predicting regional spatial distribution of soil texture in floodplains using remote sensing data: A case of southeastern Iran. *Catena*, 182, 104149. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104149>.

38. Song, X.-D., Brus, D. J., Liu, F., Li, D.-C., Zhao, Y.-G., Yang, J.-L. and Zhang, G.-L. 2017. Mapping soil organic carbon content by geographically weighted regression: A case study in the Heihe River Basin, China. *Geoderma*, 305, 314–327. [https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.06.026] (https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.06.026)
39. Srisomkiew, S., Kawahigashi, M., Limtong, P. and Yuttum, O. 2022. Digital soil assessment of soil fertility for Thai jasmine rice in the Thung Kula Ronghai region, Thailand. *Geoderma*, 409, 115597.
40. Sys, C., Van Ranst, E. and Dedaveye, J. 1991. Land evaluation. Part II: methods in land evaluation. General administration for development cooperation. Agriculture Publishing, No: 7, Brussels, Belgium
41. Taghizadeh-Mehrjardi, R., Schmidt, K., Amirian-Chakan, A., Rentschler, T., Zeraatpisheh, M., Sarmadian, F. and Scholten, T. 2020. Improving the spatial prediction of soil organic carbon content in two contrasting climatic regions by stacking machine learning models and rescanning covariate space. *Remote Sensing*, 12(7), 1095.
42. Tunçay, T., Kılıç, Ş., Dedeoğlu, M., Dengiz, O., Başkan, O. and Bayramin, I. 2021. Assessing soil fertility index based on remote sensing and gis techniques with field validation in a semiarid agricultural ecosystem. *Journal of Arid Environments*, 190, 104525. [https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104525]
43. Vasu, D., Sahu, N. C. and Raghuvanshi, N. S. 2021. Modelling the spatial variability of soil micronutrients for site-specific nutrient management in a semi-arid tropical environment. *Modelling Earth Systems and Environment*, 7(4), 1797–1808. [https://doi.org/10.1007/s40808-021-01145-0]
44. Wilding, L.P. 1985. Spatial variability: its documentation, accomodation and implication to soil surveys. In *Soil spatial variability*, Las Vegas NV, 166-194.
45. Yang, R.M., Zhang, G.L., Liu, F., Lu, Y.Y., Yang, F., Yang, F., Yang, M., Zhao, Y.G. and Li, D.C. 2016. Comparison of boosted regression tree and random forest models for mapping topsoil organic carbon concentration in an alpine ecosystem. *Ecological Indicators*, 60: 870-878. DOI: 10.1016/j.ecolind.2015.08.036.
46. Zeraatpisheh, M., Ayoubi, S., Sulieman, M. and Rodrigo-Comino, J. 2019. Determining the spatial distribution of soil properties using the environmental covariates and multivariate statistical analysis: a case study in semi-arid regions of Iran. *J. Arid. Land* 11, 551–566. [https://doi.org/10.1007/s40333-019-0059-9]
47. Zeraatpisheh, M., Jafari, A., Bodaghabadi, M.B., Ayoubi, S., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Toomanian, N. and Kerry, R., Xu, M. 2020. Conventional and digital soil mapping in Iran: Past, present, and future. *Catena*, 188, 104424.
48. Zhang, G. L. and Feng, L. I. U. 2017. Recent progress and future prospect of digital soil mapping: A review. *Journal of integrative agriculture*, 16(12), 2871-2885.
49. Zhou, Y., Chen, S., Zhu, A.-X.-X., Hu, B., Shi, Z., and Li, Y. 2021. Revealing the scale- and location-specific controlling factors of soil organic carbon in Tibet. *Geoderma* 382, 114713. [https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114713]



Trends of nitrogen changes and the effect of amino acids on flowering and fruit set of citrus trees

Ali Asadi kangarshahi ^{a*} , and Negin Akhlaghi Amiri ^a 

^a Mazandaran Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Mazandaran, Iran.

Article Info

Article Type

Research Article

Received

February 22, 2026

Revised

May 04, 2026

Accepted

May 11, 2026

Published online

June 17, 2026

Keywords

Dropping of reproductive organs,
nitrogen storage,
Satsuma mandarin,
Thomson navel orange

*Corresponding author's email

kangarshahi@gmail.com

Extended Abstract

Background and Objectives: Amino acids are a large group of biological compounds that contain an amino group and a carboxyl group. Amino acids used in foliar nutrition are usually mixtures of different amino acids and short-chain peptides. These amino acids are plant growth stimulants that can be used by foliar spraying and fertigation. Plants may consume amino acids as a source of nitrogen, and in some cases, the amino acid may also be a plant stimulant. On the other hand, the flowering and fruiting period in citrus trees is the most important and critical stage of fruit development in fruit trees. The maintenance of reproductive organs and fruits during this period is directly related to the final yield of the trees. There is a high demand for nitrogen during the flowering and fruiting period. For this purpose, the trend of leaf nitrogen changes during the flowering stage of citrus trees and the effect of amino acids on nitrogen concentration, flower drop, and fruit formation of citrus trees were investigated in two separate experiments.

Materials and Methods: In the first experiment, trends of nitrogen changes in the leaves of Satsuma mandarin (*C. unshiu* cv. Miyagawa) trees on Carrizo citrange (*Citrus sinensis* Osb. × *Poncirus trifoliata* L. Raf.), rootstock, and on Thomson Navel oranges on Sour Orange (*C. aurantium* L.) rootstock were measured in the eastern Mazandaran region. In the second experiment, the effect of foliar spraying of amino acids (combined amino acids) was carried out in a randomized complete block design with three treatments and three replications for three years with Satsuma mandarin (*C. unshiu* cv. Miyagawa) trees on Carrizo citrange (*Citrus sinensis* Osb. × *Poncirus trifoliata* L. Raf.), rootstock. The treatments included: T₁. Control; T₂. amino acid 1 g L⁻¹; T₃. amino acid 3 g L⁻¹. The amino acid mixture used contained 8% aspartic acid, 12% glutamic acid, 14% serine, 8% glycine, 2% histidine, 6% arginine, 6% alanine, 6% threonine, 12% proline, 6% valine, 7% leucine, 5% phenylalanine, and about 1% methionine, cysteine, lysine, isoleucine, and tyrosine, and 13% total nitrogen.

Results: The results of the first experiment showed that the nitrogen concentration of leaves in Satsuma gradually began to decrease from the time of bud break and the beginning of spring shoot growth, and reached a minimum at the flower opening stage, from 2.65% at the beginning of sampling to 1.84% at full bloom. From full bloom, the amount of nitrogen in the leaves gradually increased again, from 1.84% to 2.66% at the physiological fruit drop (June drop) stage. In the case of Thomson Navel orange trees, the results showed that the nitrogen concentration decreased from 2.57% at the time of sampling to 1.85% at full bloom. After flowering, the nitrogen in the leaves gradually increased and reached from 1.85% to 2.56% at the physiological fruit drop (June drop) stage. The results of the second experiment showed that foliar spraying of amino acids at concentrations of one and three parts per thousand (W/V) showed that foliar spraying treatments had no significant effect on reducing flower and fruit drop, increasing fruit set, leaf nitrogen concentration, and increasing the yield of Satsuma mandarin trees.

Conclusion: According to the results of this study, the flowering time in citrus trees coincides with the minimum nitrogen concentration in the leaves. This indicates the limitation and need for nitrogen in this sensitive stage of phenology, but foliar spraying of amino acids did not have a significant effect on increasing nitrogen concentration and fruit set. Therefore, foliar application of amino acids for citrus trees during the flowering and fruit set stages in the climatic conditions of the north of the country is not recommended for citrus orchards

Cite this article: Asadi Kangarshahi, A., Akhlaghi Amiri, N., 2026. Trends of nitrogen changes and the effect of amino acids on flowering and fruit set of citrus trees. Research Article, *Journal of Soil Research*, 40 (1), pp 23-43.



DOI: <https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.372348.814>

Publisher: Soil Science Society of Iran



نشریه پژوهش‌های خاک

(علوم خاک و آب)

<https://srjournal.arsoc.ir/>



روند تغییرات نیتروژن و تأثیر اسیدهای آمینه در گلدهی و تشکیل میوه مرکبات

علی اسدی کنگرشاهی^{۱*} و نگین اخلاقی امیری^۱

^۱ مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مازندران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

به منظور بررسی روند تغییرات نیتروژن برگ در طول مرحله گلدهی و تأثیر اسیدهای آمینه در ریزش گل و تشکیل میوه درختان مرکبات، دو آزمایش مجزا انجام شد. در آزمایش اول روند تغییرات غلظت نیتروژن در برگ‌های درختان بارده نارنگی انشو و پرتقال تامسون ناول در منطقه شرق مازندران اندازه‌گیری شد. در آزمایش دوم تأثیر محلول‌پاشی اسیدهای آمینه (اسید آمینه ترکیبی)، در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تیمار و سه تکرار به مدت سه سال با درختان نارنگی انشوی میاگوا انجام شد. تیمارها شامل: T₁. شاهد (محلول‌پاشی با آب)؛ T₂. محلول‌پاشی اسید آمینه یک در هزار؛ T₃. محلول‌پاشی اسید آمینه سه در هزار بود. نتایج آزمایش اول نشان داد که غلظت نیتروژن در برگ‌ها از زمان شکسته شدن جوانه‌ها و شروع رشد سرشاخه‌های بهاری، به تدریج شروع به کاهش کرد و در مرحله باز شدن گل‌ها به حداقل رسید. نتایج آزمایش دوم نشان داد که محلول‌پاشی اسیدهای آمینه با غلظت یک و سه در هزار در مرحله گلدهی، تأثیر معنی‌داری در کاهش ریزش گل و میوه‌چه‌ها، افزایش تشکیل میوه، غلظت نیتروژن برگ و افزایش عملکرد درختان نارنگی انشو نداشت. بنابراین، بر اساس نتایج این آزمایش با توجه به این که زمان گلدهی در درختان مرکبات مصادف با حداقل غلظت نیتروژن در برگ‌ها است، نشان‌دهنده محدودیت و نیاز نیتروژن در این مرحله حساس فنولوژی است، اما محلول‌پاشی اسیدهای آمینه تأثیر معنی‌داری در افزایش غلظت نیتروژن و تشکیل میوه نداشت. لذا مصرف اسیدهای آمینه برای درختان مرکبات در مرحله گلدهی و تشکیل میوه در شرایط اقلیمی شمال کشور به باغداران توصیه نمی‌شود.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۲۷

واژه‌های کلیدی

پرتقال تامسون ناول،

ریزش اندام‌های زایشی،

نارنگی انشو،

نیتروژن ذخیره

ایمیل نویسنده مسئول

kangarshahi@gmail.com

استناد: اسدی کنگرشاهی، ع.، اخلاقی امیری، ن.، ۱۴۰۵. روند تغییرات نیتروژن و تأثیر اسیدهای آمینه در گلدهی و تشکیل میوه مرکبات. مقاله پژوهشی،

نشریه پژوهش‌های خاک، (۱) ۴۰، ص ۲۳-۴۳.

DOI: <https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.372348.814>



مقدمه

به طور کلی اصطلاح محرک‌های رشد^۱ گیاهی به موادی اطلاق می‌شود که فاقد عنصر غذایی یا مواد زنده‌کش هستند و مصرف آن‌ها بر روی گیاه، بذر و یا در بستر، برخی فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاهان را تحت تأثیر قرار داده و پتانسیل رشد، توسعه و یا پاسخ به تنش‌ها را بهبود بخشد (Du Jardin, 2012). برخی پژوهشگران محرک‌های رشد گیاهی را به محرک‌های رشد، کودهای زیستی و زنده‌کش‌ها تقسیم کرده‌اند. معمولاً اگر محرک‌های رشد گیاهی اثر هورمونی داشته باشند، محرک رشد گیاهی، اگر اثرات غیر مستقیم روی قابلیت استفاده عناصر غذایی داشته باشند کودهای زیستی^۲ و اگر پاتوژن‌ها و آفات را کنترل نمایند زنده‌کش^۳ نامیده می‌شوند (Saubeital et al., 2013; Copping and Menn, 2000).

اسیدهای آمینه یک گروه بزرگی از ترکیبات بیولوژیکی هستند که حاوی یک گروه آمینی و یک گروه کربوکسیلی هستند. حدود ۲۰ اسید آمینه در ساختمان پروتئین شرکت دارند، اما بیش از ۲۵۰ اسید آمینه شناخته‌اند که در گیاهان فعالیت‌های گوناگون دارند، این فعالیت‌ها شامل حفاظت از تنش‌های زنده و غیرزنده، سیگنال دادن، ذخیره نیتروژن و کلاته کردن فلزات به صورت فیتوسیدروفورها است (Vranova et al., 2011). اسیدهای آمینه مورد استفاده در تغذیه برگی معمولاً مخلوطی از اسیدهای آمینه مختلف و پپتیدهای با زنجیره کوتاه هستند (Du Jardin, 2012). این اسیدهای آمینه همان محرک‌های رشد گیاهی هستند که می‌توانند به روش محلول-پاشی و کودآبیاری مصرف شوند (Du Jardin, 2012). اسیدهای آمینه پس از مصرف در خاک، از طریق جریان توده‌ای آب^۴ به سطح ریشه منتقل، از طریق حامل‌های ویژه در ریشه جذب می‌شوند (Biernath et al., 2008; Nasholm et al., 2009)، اما در محلول‌پاشی برگی به روش پخشیدگی به داخل برگ وارد و جذب می‌شود (Pecha et al., 2011; Kolomaznik et al., 2012). گیاهان ممکن است اسید آمینه را به عنوان منبع نیتروژن مصرف کنند و در بعضی شرایط در گیاهان ویژه‌ای، منبع اصلی نیتروژن است (Schimel and Chapin, 1996). در برخی موارد ممکن است اسید آمینه به عنوان محرک گیاهی (نه منبع نیتروژن) باشد در این حالت به مقدار کم مصرف می‌شود و نمی‌تواند به عنوان منبع نیتروژن قلمداد گردد. مصرف اسید آمینه می‌تواند موجب افزایش بیوماس (Shehata et al., 2011)، بهبود حفاظت گیاهان در برابر تنش‌های

زنده (Cohen and Gisi, 1994) و غیرزنده (Maini, 2006; Polo et al., 2006) و افزایش مقدار آنتی اکسیدان‌های درون برگ (Ardebili et al., 2012) شود. مصرف مخلوطی از اسید آمینه‌های تجاری باعث افزایش عملکرد ذرت شد، حتی وقتی کود نیتروژنی مورد استفاده به نصف تقلیل پیدا کرد (Maini et al., 2006). کلسیم وقتی همراه با اسید آمینه به کار رود، گیاه از آن استفاده بهتری خواهد کرد که این امر در گوجه‌فرنگی گزارش شده است (Maini, 2006)؛ اما مصرف کلسیم همراه با اسید آمینه در کیوی فروت جواب نداد (Otero et al., 2006). برخی گزارش‌ها نشان داده است که اختلاط عناصر کم‌نیاز با اسیدهای آمینه، کارایی محلول‌پاشی این عناصر را افزایش داده است و مخلوط سولفات آهن و اسید آمینه به صورت محلول‌پاشی در کاهش زردبرگی تاک‌های انگور مؤثر بوده است (Maini et al., 2006). مصرف خاکی اسیدهای آمینه می‌تواند موجب تحریک جمعیت مفید میکروبی خاک، معدنی شدن عناصر در خاک یا بهبود حلالیت عناصر کم‌مصرف در خاک (با کلاته و احیا کردن عناصر کم‌نیاز) شود.

گزارش شده که آمینواسیدها بخاطر داشتن نیتروژن آلی و ترکیبات طبیعی به بالانس رشدی گیاه کمک می‌کنند و پاسخ آنها را به کودهای دیگر افزایش می‌دهند. کاربرد اسیدهای آمینه سبب افزایش تولید کربوهیدرات‌ها و جذب آنها می‌شود. محلول‌پاشی اسید آمینه ال‌تریپتوفان (یک پیش ماده ایندول استیک اسید) در پرتقال ناول و نارنگی کلمانتین بدون تأثیر منفی بر کیفیت میوه در مقایسه با تیمار شاهد، سبب افزایش معنی‌دار عملکرد تجمعی ۴ ساله و عملکرد تجاری میوه‌های با اندازه بازارپسند شد (Pillitteri et al., 2010). تحقیقات متعدد نشان داده است که با محلول‌پاشی تریپتوفان یا پرولاین، رشد میوه، عملکرد و پارامترهای کیفیت میوه در پرتقال ناول، نارنگی کلمانتین و پرتقال والنسیا بهبود یافت (Caronia et al., 2010; Khuong et al., 2010; Hanafy et al., 2012). محلول‌پاشی با اسید آمینه حاوی ۳۰ درصد نیتروژن آلی و ۵ درصد نیتروژن آزاد موجب افزایش سطح برگ و میزان کلروفیل و کربوهیدرات در درختان لیمو شد (Al-Akashy et al., 2020). محلول‌پاشی آمینواسیدهای پریمو و توپین در زمان تمام گل و تشکیل میوه در نارنگی‌های کینو و فیوچر و پرتقال خونی سبب افزایش صفات رویشی، حاصلخیزی و کیفیت میوه گردید (Khan et al., 2022). کاربرد کودهای برگی بر پایه آمینواسید در زمان ریزش گلبرگ‌ها و به فواصل دو هفته از محلول‌پاشی اول، در درختان

³ biopesticides⁴ mass flow¹ biostimulant² biofertilizers

های داخلی جایگزین می‌شود. بعد از القای هورمونی رشد میوه، عناصر غذایی ممکن است عملیات تنظیم را به تنهایی یا از طریق حفظ مقادیر کافی هورمون انجام دهند (Iglesias et al., 2007). به طور کلی محرک‌های زیستی از جمله اسیدهای آمینه از بافت‌های گیاهی یا حیوانی فراهم می‌شوند که به طور طبیعی در این ارگانیزم-ها وجود دارند و طیف گسترده‌ای از تأثیرات فیزیولوژی یا بیوشیمیایی در گیاهان ایجاد می‌کنند؛ بنابراین گیاهان توانایی سنتز اسیدهای آمینه، ویتامین‌ها و اسیدهای آلی را دارند. محرک‌های زیستی گیاهی در بیشتر کشورها، در حال تولید و توسعه هستند. در مورد ضرورت مصرف، مفید بودن و نقش این مواد هنوز شک و تردیدها و یا سؤالات بسیاری وجود دارد در نتایج برخی پژوهش‌ها در مورد گروهی از محرک‌های رشد شامل ترکیبات یا مواد طبیعی سنتز شده گزارش شده است که موجب افزایش رشد و توسعه گیاهان (با افزایش راندمان کوددهی خاکی یا محلول پاشی برگ‌ها با عناصر غذایی)، بهبود عملکرد فرآیندهای فیزیولوژی یا بیوشیمیایی در بافت گیاهان، افزایش توانایی گیاهان در مقابل شرایط نامساعد محیطی، افزایش تحمل گیاهان به بیماری‌ها و پاتوژن‌ها شده‌اند. ریزش اندام‌های زایشی و میوه‌چه‌ها در مرکبات یک فرایند پیچیده است که حداقل سه سطح تنظیمی دارد: ژنتیک، متابولیت‌های تغذیه‌ای و محیط. سطوح مختلف تنظیمی ممکن است به صورت متوالی، همزمان و یا تشدید کننده همدیگر عمل کنند اگرچه هر سه تا حدودی از طریق سیگنال‌های هورمونی عمل می‌کنند (Iglesias et al., 2007). ریزش گل و میوه‌چه، فرایندی است که در بسیاری از گیاهان در پاسخ به عوامل رشدی و محیطی اتفاق می‌افتد و منجر به کاهش معنی‌دار محصول می‌شود. ریزش به میزان زیادی بسته به گونه و رقم، متفاوت است و به نظر می‌رسد که واکنشی به وضعیت تنظیم کننده‌های رشد در تخمدان و تنظیم متابولیت‌ها طی فرایند گل‌دهی باشد. علائم هورمونی و رقابت برای مواد غذایی از جمله کربوهیدرات‌ها و نیتروژن ذخیره مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر بر ریزش اندام‌های زایشی و میوه‌چه‌ها هستند (Gomez-Cadenas et al., 2000). به طور کلی هدف از این تحقیق، تعیین روند تغییرات نیتروژن برگ‌ها در مرحله اول رشد میوه در ارقام نارنگی انشو میاگوا و پرتقال تامسون ناول است و همچنین تأثیر اسیدهای آمینه ترکیبی در ریزش اندام‌های زایشی، نیتروژن برگ، تشکیل میوه و عملکرد و کیفیت میوه درختان نارنگی انشو میاگوا در شرق مازندران بود.

سیب موجب افزایش معنی‌دار عملکرد و پارامترهای وزن میوه در مقایسه با شاهد شد ولی تأثیر معنی‌داری بر وزن خشک، کل مواد جامد محلول و سفتی میوه نشان نداد (Ilie et al., 2017). گزارش شده است که آمینو اسیدها می‌توانند عملکرد پسته‌های ممتاز و فندق را افزایش دهند زیرا گیاهان می‌توانند از اسیدهای آمینه مانند منبع نیتروژن استفاده کنند (Bastam et al., 2013). در تحقیقی دیگر گزارش شد که کاربرد اسپرمین در ترکیب با اسید آمینه‌های دیگر قبل و بعد از گل‌دهی بیشتر از کاربرد آمینو اسیدها به تنهایی، به دلیل کاهش اثرات مخرب تنش‌های محیطی و افزایش نیتروژن ذخیره‌ای سبب بهبود کمیت و کیفیت پسته گردید (Kamir et al., 2015).

گزارش‌های مختلف نشان داده است که حدود پنجاه درصد نیتروژن درختان مرکبات در برگ‌ها هستند همچنین حدود پنجاه درصد از این نیتروژن برگ‌ها، در آنزیم ریبولوزی فسفات کربوکسیلاز وجود دارد که مهم‌ترین آنزیم فتوسنتزی است و در راندمان فتوسنتز نقش اساسی دارد. لذا نیتروژن بهینه در برگ‌ها در تولید و تجمع کربوهیدرات‌ها بسیار مؤثر است (Mazhar et al., 2007). دوره گلدهی و تشکیل میوه (ریزش اولیه اندام‌های زایشی و میوه‌چه‌ها) مهم‌ترین و حیاتی‌ترین مرحله توسعه میوه از دیدگاه باغ‌داران است. نگهداری بیشتر اندام‌های زایشی و میوه‌چه‌ها در طول این دوره با عملکرد نهایی درختان ارتباط مستقیم دارد. در طول دوره گل‌دهی و تشکیل میوه، تقاضای زیادی برای نیتروژن وجود دارد که عمدتاً از نیتروژن ذخیره شده در برگ‌ها تأمین می‌شود (Asadi Kangarshahi and Akhlaghi Amiri, 2025). به طور کلی، تشکیل میوه بستگی به گرده افشانی و لقاح موفق دارد زیرا حضور تخمک‌های بارور شده محرک رشد میوه است. در برخی ارقام مرکبات مانند پاپون‌اپل، فقدان باروری سبب ریزش تخمدان می‌شود زیرا در همه گل‌های اخته شده و گرده افشانی نشده، رشد متوقف می‌شود و مدت کوتاهی بعد از گلدهی، ریزش اتفاق می‌افتد. علاوه بر درجه حرارت، عوامل متعدد دیگری مثل تعداد گل، نوع گل‌آذین، موقعیت گل و وضعیت تغذیه‌ای ممکن است بر تشکیل گل و نمو آن و بنابراین تشکیل میوه تأثیر بگذارد (Iglesias et al., 2007)؛ اما در ارقام تجاری بی‌بذر مرکبات مانند ساتسوماها و ناول‌ها، عموماً یک محصول نرمال از میوه‌های پارتنوکارپ تولید می‌کنند (به علت نر و ماده عقیمی گامتی شدید). در این ارقام، توسعه میوه‌های پارتنوکارپ بدون تشکیل بذر است و بنابراین، همه مراحل گرده‌افشانی، باروری و تشکیل بذر که برای فعال کردن رشد میوه لازم است با سیگنال

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی روند تغییرات نیتروژن برگ در طول مرحله گلدهی در درختان مرکبات و تأثیر اسیدهای آمینه در کاهش ریزش گل و افزایش تشکیل میوه درختان نارنگی انشو (*Citrus unshiu* cv. Miyagawa)، دو آزمایش مجزا در باغ‌های منطقه انجام شد. در آزمایش اول به منظور تعیین روند تغییرات غلظت نیتروژن در برگ‌های درختان نارنگی انشو میاگوا بارده (حدود ۱۵ ساله) با پایه کاریزوسیترنج و درختان تامسون ناول با پایه نارنج (حدود ۲۰ ساله)، به طور تصادفی پنج درخت از هر رقم در یک باغ از منطقه بهارستان در شهرستان ساری در شرق استان مازندران انتخاب شد. سپس نمونه‌های برگ (از سرشاخه‌های توسعه یافته در بهار و تابستان سال گذشته) هر ۱۵ روز در میان از زمان شکسته شدن جوانه‌ها از اوایل اسفند ماه تا پایان ریزش فیزیولوژیک میوه‌چه‌ها در اواسط تیرماه تهیه شد. غلظت نیتروژن در نمونه برگ‌ها به روش کج‌دال^۱ اندازه‌گیری شد و نتایج مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

آزمایش دوم در یک باغ نارنگی انشو میاگوا با پایه کاریزوسیترنج از سال ۱۳۹۸ به مدت سه سال انجام شد، ابتدا مراحل فنولوژی رشد درختان با پایش مراحل رشد تعیین شد (Asadi kangarshahi, 2019). سپس قبل از انجام آزمایش، نمونه‌های خاک در اسفندماه و برگ در مردادماه از درختان تهیه شد و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مانند بافت خاک، شوری، کربنات کلسیم معادل، pH، ماده آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی و غلظت عناصر غذایی فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، آهن، روی، منگنز، مس و بور قابل جذب اندازه‌گیری شد (Bashour & Sayegh, 2007). نمونه‌های برگ در اواخر مردادماه از برگ‌های میانی سرشاخه‌های فصل جاری در پیرامون هر درخت تهیه (Asadi kangarshahi & Akhlaghi Amiri, 2014) و غلظت عناصر غذایی نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، آهن، روی، منگنز و مس در آن‌ها اندازه‌گیری شد (Bremner, 1996). نتایج تجزیه خاک و برگ درختان قبل از انجام آزمایش، به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی، با سه تیمار و سه تکرار در هفته آخر فروردین ماه انجام شد. تیمارها عبارت بودند از: T₁: شاهد (محلول پاشی با آب)؛ T₂: محلول پاشی اسید آمینه یک در هزار؛ T₃: محلول پاشی اسید آمینه سه در هزار. اسید آمینه مصرفی مخلوطی از اسیدهای آمینه مختلف بود که نوع، فرمول شیمیایی، وزن مولکولی و درصد هر اسید آمینه در ترکیب مصرفی و همچنین

درصد نیتروژن در هر اسید آمینه و نیتروژن کل ترکیب مصرفی در جدول ۴ آمده است.

مقدار مصرف کودهای شیمیایی برای همه تیمارهای آزمایشی یکسان بود و با توجه به نتایج تجزیه خاک، برگ و همچنین میانگین عملکرد درختان تعیین شد (Asadi kangarshahi, 2019). تعداد درختان در هکتار حدود ۵۰۰ اصله بود. نیتروژن به شکل اوره (۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار)، فسفر به شکل اسید فسفریک (۵۰ کیلوگرم فسفر (P₂O₅) در هکتار)، پتاسیم به شکل سولفات پتاسیم (۱۰۰ کیلوگرم پتاس (K₂O) در هکتار)، منیزیم به شکل سولفات منیزیم (۵۰ کیلوگرم منیزیم (MgO) در هکتار) به صورت کودآبیاری مصرف شد. زمان مصرف نیتروژن، پتاسیم، فسفر، منیزیم و منگنز در همه تیمارهای آزمایشی یکسان و متناسب با فنولوژی رشد بود. کود حاوی نیتروژن اوره: ۳۰ درصد قبل از گلدهی، ۳۰ درصد پس از تشکیل میوه، ۲۵ درصد پس از پایان ریزش فیزیولوژیک میوه‌چه‌ها در اوایل مرحله دوم رشد و توسعه میوه‌ها، ۱۵ درصد بقیه در اواسط مرحله دوم رشد میوه به شکل کودآبیاری مصرف شد. کود سولفات پتاسیم ۲۰ درصد در پس از تشکیل میوه تا زمان ریزش تابستانه، ۲۰ درصد در اوایل مرحله دوم رشد و توسعه (۳۰ درصد در اواسط مرحله دوم رشد میوه، ۳۰ درصد در اواخر مرحله دوم رشد میوه به شکل کودآبیاری مصرف شد. اسید فسفریک ۳۰ درصد در اردیبهشت ماه (مرحله گلدهی و تشکیل میوه)، ۳۰ درصد در خرداد ماه (پس از تشکیل میوه تا زمان ریزش تابستانه)، ۲۰ درصد در تیر ماه (در اوایل مرحله دوم رشد و توسعه) و ۲۰ درصد در مرداد ماه (اواسط مرحله دوم رشد میوه) به شکل کودآبیاری مصرف شد. سولفات منیزیم نیز ۲۰ درصد در خرداد ماه (پس از تشکیل میوه تا زمان ریزش تابستانه)، ۲۰ درصد در تیر ماه (در اوایل مرحله دوم رشد و توسعه)، ۳۰ درصد در مرداد ماه (اواسط مرحله دوم رشد میوه)؛ ۳۰ درصد در شهریور ماه (اواخر مرحله دوم رشد میوه) به شکل کودآبیاری مصرف شد (Asadi kangarshahi, 2019). مصرف سولفات روی به مقدار ۱۰۰ گرم به ازای هر درخت در مرحله اول و دوم رشد میوه (۵۰ گرم پس از تشکیل میوه در اواسط مرحله اول رشد میوه و ۵۰ گرم در اوایل مرحله دوم رشد میوه‌ها) انجام شد. در طول فصل رشد، عملیات زراعی مانند سمپاشی، آبیاری، دفع علف‌های هرز و غیره به طور یکسان اعمال گردید. نمونه‌های برگ در همه تیمارها از اواخر مرداد ماه از برگ‌های میانی سرشاخه‌های فصل جاری در پیرامون هر درخت تهیه شد (Asadi kangarshahi & Akhlaghi Amiri, 2014). برای اندازه‌گیری نیتروژن ابتدا نمونه‌های برگ و میوه‌چه‌ها

¹ kjeldahl

اندازه‌گیری شد (Kimball, 1991). شاخص برداشت با استفاده از نسبت مواد جامد محلول به اسیدیته قابل تیتراسیون عصاره و درصد عصاره میوه با استفاده از نسبت عصاره به وزن میوه محاسبه شد (Tazima et al., 2013). کلیه داده‌های حاصل با استفاده از نرم‌افزارهای آماری SPSS و همچنین آزمون F مورد تجزیه واریانس قرار گرفت. مقایسه میانگین صفات مورد مطالعه با استفاده از آزمون دانکن در سطح ۵ درصد انجام شد. تقویم زمانی برخی از مراحل کلیدی فنولوژی درختان نارنگی انشوی میاگاوا در منطقه و همچنین ترکیب اسید آمینه مصرفی (نوع، درصد، وزن ملکولی و فرمول شیمیایی هر اسید آمینه) به ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.

را در دمای ۶۵ درجه سانتیگراد در آون خشک و سپس غلظت آن به روش کج‌لدال اندازه‌گیری شد (Bremmer, 1996). در هر درخت چهار شاخه در چهار جهت و یک شاخه در قسمت داخلی تاج درختان انتخاب و علامت گذاری شد و تعداد گل‌ها، میوه‌چه‌ها، برگ‌های جست بهاره و میوه‌های آنها شمارش شد. در انتهای فصل رشد، عملکرد هر درخت در هر تیمار تعیین و ۱۰ میوه به طور تصادفی از هر درخت در هر تیمار نمونه‌برداری و برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی میوه شامل: وزن میوه و پوست (با استفاده از ترازوی دیجیتال)، ابعاد میوه و ضخامت پوست (با استفاده از کولیس دیجیتال)، میزان عصاره (با استفاده از آب‌میوه‌گیر دستی)، میزان مواد جامد محلول (با استفاده از رفراکتومتر چشمی) و اسیدیته قابل تیتراسیون عصاره (به وسیله تیتراسیون با سود یک دهم نرمال)

جدول ۱- برخی خواص فیزیکی و شیمیایی خاک باغ قبل از آزمایش.

Table 1. Some physical and chemical properties of soil orchard before experiment.

| مس | منگنز | روی | آهن | منیزیم | پتاسیم | فسفر | ماده آلی | آهک | ظرفیت تبادل کاتیونی | pH | هدایت الکتریکی | عمق |
|-----|-------|-----|---------------------|--------|--------|------|----------|---------|-----------------------------|------|-------------------------|-------------|
| Cu | Mn | Zn | Fe | Mg | K | P | (درصد) | (درصد) | (سانتی‌مول بر کیلوگرم) | | (دسی‌زیمنس بر متر) | (سانتی‌متر) |
| | | | میلی‌گرم در کیلوگرم | | | | O.M (%) | CCE (%) | CEC (cmolkg ⁻¹) | | EC (dsm ⁻¹) | Depth (cm) |
| 1.6 | 10.7 | 2.4 | 5.7 | 465 | 203 | 19.3 | 1.40 | 11 | 21.49 | 7.53 | 0.89 | 0-30 |
| 1.4 | 8.8 | 2.2 | 4.6 | 460 | 196 | 16.6 | 1.03 | 12 | 19.94 | 7.64 | 0.75 | 31-60 |

بافت خاک: لوم

Soil texture: loam

جدول ۲- میانگین غلظت عناصر غذایی (درصد وزن خشک) در برگ نارنگی انشوی میاگاوا قبل از اجرای آزمایش

Table 2. Mean nutrient elements concentrations (percentage of dry weight) in the leaves of Miyagawa satsuma mandarin before experiment

| بور | مس | منگنز | روی | آهن | کلسیم | منیزیم | پتاسیم | فسفر | نیتروژن | غلظت |
|-----|------|---------------------|-------|-----|-------|--------|--------|------|---------|---------------|
| B | Cu | Mn | Zn | Fe | Ca | Mg | K | P | N | concentration |
| | | میلی‌گرم در کیلوگرم | | | | | درصد | | | |
| | | mgkg ⁻¹ | | | | | (%) | | | |
| 47 | 7.04 | 26.50 | 20.40 | 171 | 3.85 | 0.33 | 0.90 | 0.15 | 2.46 | |

جدول ۳- مراحل فنولوژی رشد نارنگی ساتسوما (انشوی میاگاوا) در شرق مازندران (Asadi kangarshahi, 2019)
 Table 3. Phenological stages of Satsuma mandarin (*C. unshiu* cv. Miyagawa) growth in East of Mazandaran (Asadi kangarshahi, 2019)

| بازه زمانی Time period | مرحله رشد Growth stages | توسعه میوه Fruit development |
|-------------------------------------|---|---------------------------------|
| ۵-۱۰ اسفند Feb. 25-30 | شکست جوانه‌ها Bud break | - |
| ۱۰-۱۵ اردیبهشت April 25-30 | گلدهی Flowering | |
| ۱۵-۲۵ اردیبهشت May 5-15 | تشکیل میوه Fruit set | فاز اول Phase I |
| ۱۵-۲۰ خرداد June 5-10 | شروع ریزش تابستانه Commencement of Summer drop | |
| ۲۵-۳۰ خرداد June 15-20 | پایان ریزش تابستانه End of June drop | |
| ۲۵-۳۰ خرداد June 15-20 | شروع انبساط سلولی Commencement of cell expansion | |
| ۱۰-۱۵ شهریور September 1-5 | شروع رشد سرشاخه‌های پاییزه Commencement of autumn shoot growth | |
| ۱۵-۲۰ شهریور September 5-10 | شروع تغییر رنگ میوه Commencement of fruit color change | فاز دوم Phase II |
| ۲۵-۳۰ شهریور September 15-20 | بلوغ فیزیولوژی میوه Physiological fruit maturity | |
| ۱۰-۲۰ آبان November 1-10 | پایان رشد سرشاخه‌های پاییزه End of autumn shoot growth | |
| ۱-۲۰ مهر September 22-October 12 | رسیدن میوه Fruit ripening | فاز سوم Phase III |

جدول ۴- ویژگی اسیدهای آمینه مورد استفاده در آزمایش (Wu,2013)

(نوع و درصد در ترکیب، وزن ملکولی و فرمول شیمیایی، مقدار نیتروژن در هر اسید آمینه و در کل ترکیب مصرفی)

Table 4. Composite amino acid used in the experiment (Wu,2013)

(Type and percentage in the composition, molecular weight and chemical formula, amount of nitrogen in each amino acid and in the total composition)

| اسید آمینه مصرفی Applied amino acid | | | | | | |
|--|--------------------------------------|--|--|------------------------------------|-----------------------------------|---------------|
| نیتروژن (درصد در ترکیب) Nitrogen (Percentage in the composition) | نیتروژن (درصد) Nitrogen (%) | فرمول شیمیایی Chemical formula | وزن ملکولی (گرم بر مول) Molecular weight (g/mol) | ترکیب (درصد) Composition (%) | نام اسید آمینه Amino acid name | |
| 1.87 | 13.33 | C ₃ H ₇ NO ₃ | 105.1 | 14 | serine | سرین |
| 1.14 | 9.52 | C ₅ H ₉ NO ₄ | 147.1 | 12 | Glutamic acid | گلوتامیک اسید |
| 1.46 | 12.17 | C ₅ H ₉ NO ₂ | 115.1 | 12 | proline | پرولین |
| 0.84 | 10.53 | C ₄ H ₇ NO ₄ | 133.1 | 8 | Aspartic acid | آسپارتیک اسید |
| 1.49 | 18.67 | C ₂ H ₅ NO ₂ | 75.1 | 8 | glycine | گلیسین |
| 0.75 | 10.69 | C ₆ H ₁₃ NO ₂ | 131.2 | 7 | leucine | لیوسین |
| 2 | 33.33 | C ₆ H ₁₄ N ₄ O ₂ | 174.2 | 6 | arginine | آرژینین |
| 0.94 | 15.73 | C ₃ H ₇ NO ₂ | 89.1 | 6 | alanine | آلانین |
| 0.71 | 11.76 | C ₄ H ₉ NO ₃ | 119.12 | 6 | threonine | ترئونین |
| 0.72 | 11.96 | C ₅ H ₁₁ NO ₂ | 117.15 | 6 | valine | والین |
| 0.42 | 8.48 | C ₉ H ₁₁ NO ₂ | 165.2 | 5 | phenylalanine | فنیل آلانین |
| 0.54 | 27.10 | C ₆ H ₉ N ₃ O ₂ | 155.15 | 2 | histidine | هیستیدین |
| 0.094 | 9.39 | C ₅ H ₁₁ NO ₂ S | 149.2 | 1 | methionine | متیونین |
| 0.12 | 11.57 | C ₃ H ₇ NO ₂ S | 121.2 | 1 | cysteine | سیستین |
| 0.096 | 9.59 | C ₆ H ₁₄ N ₂ O ₂ | 146.2 | 1 | lysine | لیزین |
| 0.11 | 10.69 | C ₆ H ₁₃ NO ₂ | 131.17 | 1 | isoleucine | ایزولوسین |
| 0.07 | 7.34 | C ₉ H ₁₁ NO ₃ | 181.19 | 1 | tyrosine | تیروسین |
| 13.37 | | Total nitrogen of the applied mixture(w/w) مصرفی | | | | |

نتایج و بحث

طور کلی نتایج این آزمایش نشان داد که زمان گلدهی در درختان مرکبات مصادف با حداقل غلظت نیتروژن در برگ‌ها است. در درختان مرکبات، تعداد گل‌ها عامل تعیین کننده عملکرد نهایی میوه نیست بلکه تشکیل میوه عامل تعیین کننده عملکرد است بنابراین برای باغداران، مرحله تشکیل میوه از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است (Agusti et al., 1982). دو موج اصلی ریزش در مرکبات وجود دارد موج اول ریزش اندام‌های زایشی است که در مرحله گلدهی رخ می‌دهد و موج دوم ریزش در مرحله توسعه میوه‌چه‌ها است که به ریزش تابستانه^۱ معروف است. اهمیت نسبی این دو موج ریزش، به شدت گلدهی بستگی دارد. هر چه تعداد گل‌ها بیشتر باشد تعداد اندام‌های زایشی که به مرحله میوه‌چه می‌رسند کاهش می‌یابد (Agusti et al. 1982). هرچه تعداد جوانه‌های گل بیشتر باشد مقدار ریزش جوانه‌ها قبل از باز شدن جوانه‌های گل افزایش می‌یابد. نتایج پژوهش‌های مختلف نشان داده است که از شکسته شدن جوانه‌ها تا

نتایج بررسی روند غلظت نیتروژن برگ درختان مرکبات باره در آزمایش اول نشان داد که غلظت نیتروژن برگ‌ها در نارنگی انشو میاگوا با پایه کاریوسیترنج از زمان شکسته شدن جوانه‌ها و شروع رشد رشد سرشاخه‌های بهاری به تدریج شروع به کاهش کرد و در مرحله باز شدن گل‌ها به حداقل رسید به طوری از ۲/۶۵ درصد در شروع نمونه‌برداری به ۱/۸۴ درصد در گلدهی کامل رسید. از گلدهی کامل مجدداً مقدار نیتروژن برگ‌ها به تدریج افزایش یافت از ۱/۸۴ درصد به ۲/۶۶ درصد در مرحله ریزش فیزیولوژیک میوه-چه‌ها رسید (شکل ۱). در مورد درختان پرتقال تامسون ناول با پایه نارنج نتایج نشان داد که غلظت نیتروژن از ۲/۵۷ درصد در شروع نمونه‌برداری به ۱/۸۵ درصد در گلدهی کامل رسید پس از گلدهی، نیتروژن برگ‌ها به تدریج افزایش یافت و از ۱/۸۵ درصد به ۲/۵۶ درصد در مرحله ریزش فیزیولوژیک میوه‌چه‌ها رسید (جدول ۵). به

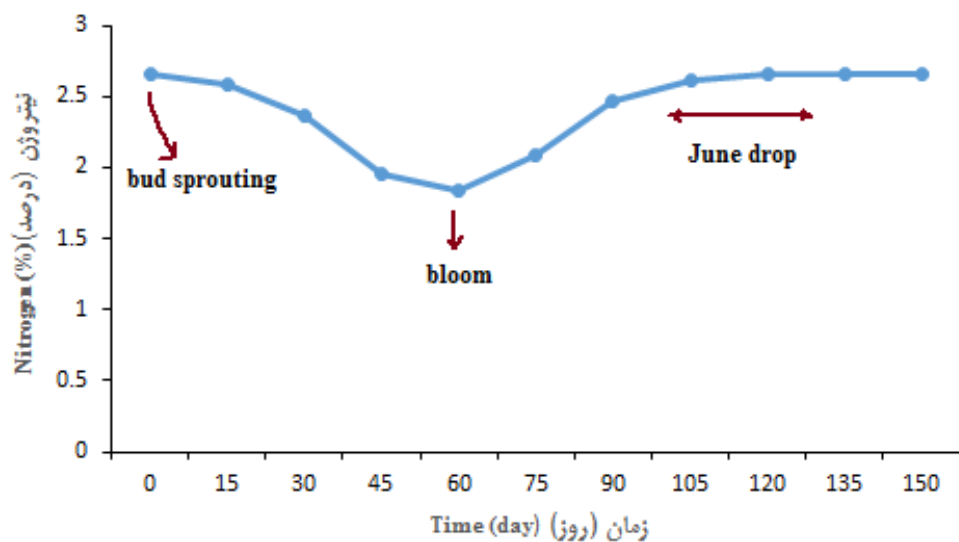
¹ June drop

درصد نیتروژن ذخیره برگ‌ها به شکل پروتئین و بقیه به شکل ترکیبات نیتروژنی محلول به ویژه اسیدهای آمینه هستند. میانگین کل پروتئین به ازای هر برگ بالغ مرکبات حدود ۱۳ میلی گرم (حدود ۲ میلی گرم نیتروژن) است و ۵۰ تا ۷۰ درصد از این پروتئین به شکل پروتئین محلول است که قابلیت انتقال مجدد را دارد (Ruiz and Guardiola, 1994). نتایج این آزمایش با پژوهش‌های Sanz و همکاران (۱۹۸۷) مطابقت دارد که گزارش کردند مرحله شکوفایی درختان پرتقال تامسون ناول مصادف با حداقل غلظت نیتروژن در برگ است و جذب عناصر غذایی توسط ریشه‌ها در این مرحله بسیار پایین است. همچنین آنها گزارش کردند که از شروع شکستن جوانه-ها تا گلدهی، میزان فتوسنتز بیشتر از مصرف کربوهیدراتها است به طوری در این مرحله کربوهیدراتها در برگها تجمع می‌یابند؛ بنابراین رشد اندام‌های در حال توسعه در این مرحله عمدتاً به انتقال مجدد نیتروژن از اندام‌های ذخیره بستگی دارد به طوری که میزان انتقال مجدد نیتروژن از برگ‌ها بخش عمده نیتروژن مورد نیاز برای تشکیل و رشد اندام‌های جدید تا شکوفایی را تامین می‌کند و مدت کوتاهی پس از شکوفایی، میزان نیتروژن برگ‌ها مجدداً افزایش می‌یابد (Sanz et al., 1987; Cheng and Robinson, 2004). این گزارش با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. به طور کلی بیشتر ارقام مرکبات، تعداد بسیار زیادی گل می‌دهند اما در بیشتر موارد عامل تعیین کننده عملکرد نهایی میوه، تشکیل میوه (نه تعداد گل‌ها) است. ریزش عمده اندام‌های زایشی در مرحله شکوفایی گل‌ها یا مدتی قبل از آن یا چند هفته بعد رخ می‌دهد. اهمیت نسبی این مراحل ریزش به شدت گلدهی (تعداد گل‌ها) و تعداد نسبی تبدیل تخمدان‌ها به میوه‌چه بستگی دارد هرچه شدت گلدهی بیشتر باشد تعداد تخمدان‌های که به میوه‌چه تبدیل می‌شوند کاهش می‌یابد. علاوه بر این موقعه‌ای که تعداد جوانه‌های گل بسیار زیاد است نسبت زیادی از آنها ممکن است قبل از شکوفایی ریزش کنند (Agusti et al., 1982). نتایج پژوهشی نشان داده است رقابت این اندام‌های در حال توسعه برای برخی عناصر غذایی به ویژه نیتروژن، عامل اصلی تعیین کننده ریزش است.

گلدهی، نه تنها مقدار کربوهیدرات‌های قابل مصرف^۱ محدود کننده نیست بلکه مقدار نسبی آنها در برگ‌ها نیز افزایش می‌یابد. همچنین مقدار فتوسنتز در این مرحله نیز بیشتر از مقدار مصرف کربوهیدرات‌ها توسط اندام‌های زایشی است به طوری که کربوهیدرات‌ها و نشاسته در برگ‌ها دیگر اندام‌های درختان تجمع می‌یابند اما مقدار ساکارز و قندهای محلول در طی این مرحله تقریباً ثابت است. با این حال، جذب عناصر غذایی از جمله نیتروژن توسط ریشه‌ها در طی این مرحله بسیار محدود است و در مقابل رشد اندام‌های در حال توسعه به انتقال مجدد عناصر غذایی ذخیره به ویژه نیتروژن ذخیره شده بستگی دارد؛ بنابراین راهکارهای عملی برای افزایش نیتروژن ذخیره و یا فراهمی نیتروژن در این مرحله گلدهی، می‌تواند تشکیل اولیه میوه را افزایش دهد (Ruiz et al., 2001).

برخی پژوهش‌ها نشان داده است که مقدار نیتروژن در میوه‌چه‌ها با مقدار ماده خشک آنها ارتباط خطی دارد به طوری که به ازای هر گرم افزایش در ماده خشک میوه‌چه‌ها حدود ۲۴/۵ میلی گرم نیتروژن تجمع می‌یابد این عنصر غذایی در طی شکستن جوانه-ها و گلدهی از برگ‌های خارج و به اندام‌های در حال توسعه منتقل می‌شود به طوری غلظت آن به تدریج کاهش می‌یابد (Ruiz et al., 2001). مصرف نیتروژن در پاییز پس از برداشت موجب افزایش نیتروژن ذخیره و کاهش کربوهیدرات‌های ذخیره درختان شد و عملکرد سال بعد درختان بیشتر به مقدار نیتروژن ذخیره تا کربوهیدرات‌های ذخیره بستگی دارد به طوری که رشد رویشی و میوه‌دهی عمدتاً به وضعیت نیتروژن ذخیره درختان وابسته است؛ بنابراین راهکارهای عملی مدیریت باغ برای افزایش نیتروژن ذخیره درختان از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است (Cheng and Robinson, 2004; Zhao et al., 2025). نتایج این پژوهش با گزارش‌های دیگر مطابقت دارد که نشان دادند درختان مرکبات دارای مقدار زیادی ترکیبات نیتروژنی ذخیره در اندام‌های خاص به ویژه برگ‌ها هستند. این نیتروژن در طی پاییز و زمستان تجمع و در اندام‌های رویشی و زایشی جدید در اوایل مصرف می‌شوند (Ruiz and Guardiola, 1994). پژوهش‌های زیادی در مورد نیتروژن ذخیره انجام نشده است اما به طور کلی برخی گزارش‌ها نشان داده است که حدود ۶۰ تا ۷۰

¹ metabolizable carbohydrates



شکل ۱- روند تغییرات غلظت نیتروژن در برگ درختان نارنگی انشو میاگوا از ۱۰ اسفند تا ۱۰ مردادماه (از شکسته شدن جوانه‌ها تا پایان ریزش تابستانه میوه‌چه‌ها)

Figure 1. Changes trends of nitrogen concentration in the old leaves of Miyagawa satsuma mandarin trees (from bud sprouting until the end of June drop)

جدول ۵- روند تغییرات غلظت نیتروژن در برگ درختان نارنگی پرتقال تامسون ناول از اول اسفند تا ۱۵ تیرماه (از شکسته شدن جوانه‌ها تا پایان ریزش تابستانه میوه‌چه‌ها)

Table 5. Changes trends of nitrogen concentration in the old leaves of Thompson navel orange trees (from bud sprouting until the end of June drop)

| | تشکیل میوه تا پایان ریزش تابستانه میوه‌چه‌ها | | | شروع گلدهی تا پایان ریزش گلبرگ‌ها | | | شکستن جوانه‌ها و رشد سرشاخه‌ها | | فنولوژی phenology | |
|-------|--|-------|-------|---|-------|-------|--------------------------------|-------|-------------------|---------------------------|
| | Fruit set to end of June drop | | | Commencement of flowering to petal fall | | | bud sprouting and shoot growth | | | |
| 135 | 120 | 105 | 90 | 75 | 60 | 45 | 30 | 15 | 0 | زمان (روز) Time (days) |
| 2.56a | 2.56a | 2.52a | 2.39b | 2.11c | 1.85d | 1.98c | 2.34b | 2.54a | 2.57a | نیتروژن (درصد) N (%) |



شکل ۲- تغییرات علائم ظاهری برگ درختان نارنگی نارنگی انشو میاگاو و پرتقال تامسون ناول در طی گلدهی و تشکیل میوه
 Figure 2. Changes in leaves appearance symptoms of Miyagawa satsuma mandarin and Thompson navel orange trees during flowering and fruit set

متابولیک در طی جهش‌های رشدی باشد (Moreno and Garcia-). مقدار پرولین در برگ درختان مرکبات در فصل زمستان تا حدود ۹۵ درصد کل اسیدهای آمینه در فصل زمستان افزایش می‌یابد سپس به طور پیوسته از اواخر زمستان تا اوایل اردیبهشت ماه کاهش می‌یابد و به علت عدم تولید خالص پروتئین در طی این دوره می‌توان نتیجه‌گیری کرد که نیتروژن پرولین از برگ‌ها برای دیگر اندام‌های در حال توسعه خارج می‌شود. نیتروژن آلی، اغلب به شکل مولکول‌های غنی از نیتروژن مانند آمیدها منتقل می‌شوند. افزایش آرژنین در مرحله جهش‌های رشدی بهار نشان می‌دهد که آرژنین ممکن است این نقش انتقالی در برگ‌های مرکبات داشته باشد همچنانکه در شیره آوندهای چوبی وجود دارد. تجمع پرولین در برگ‌ها، شاخه‌ها و شیره آوند چوبی درختان مرکبات، یک پاسخ معمول به سرد شدن هوا در اواخر پاییز و زمستان است. به طور کلی پرولین، به عنوان یک ذخیره مهم نیتروژن عمل می‌کند و می‌تواند تا حدود ۰/۶ میلی‌گرم نیتروژن به ازای هر برگ را فراهم کند. این مقدار تنها ۳۰ تا ۴۰ درصد نیتروژنی است که توسط پروتئین‌ها فراهم می‌شود اما نیتروژن پرولین در فاصله زمانی کوتاه‌تری و در

برخی پژوهشگران دیگر نیز تأثیر محدودیت فراهمی نیتروژن در ریزش گل‌ها و تشکیل اولیه میوه را گزارش کرده‌اند (Guardiola et al., 1984). نتایج پژوهشی مختلف نشان داده است که مقدار اسیدهای آمینه (نیتروژن آمینی) برگ‌ها در فصل زمستان به مقدار زیادی افزایش می‌یابد و در اواخر دی و بهمن به حداکثر (حدود ۱/۲ میلی‌گرم نیتروژن آمینی) به ازای هر برگ می‌رسد. مقدار اسیدهای آمینه برگ‌ها مرکبات حدود چند هفته قبل از شروع جهش-های رشدی اوایل فصل تا زمان ریزش گلبرگ‌ها و تشکیل میوه به نصف کاهش یافت و تقریباً در بقیه طول سال ثابت باقی می‌ماند. پرولین در کل چرخه رشد، اسید آمینه غالب در برگ درختان مرکبات است که بیشتر از ۸۵ درصد اسیدهای آمینه را در فصل زمستان تشکیل می‌دهد. دیگر اسیدهای آمینی با مقدار نسبتاً بالا در برگ درختان مرکبات، سرین (۲ تا ۱۲ درصد)، اسید بوتیریک (۲ تا ۱۴ درصد)، آرژنین (۱ تا ۹ درصد)، گلوتامیک اسید (۱ تا ۹ درصد)، آسپارازین (۱ تا ۱۲ درصد) هستند. گرچه تنوع اسیدهای آمینه در طی فصل رشد تغییر می‌کند و در ترکیب شیره سلولی نیز این تغییرات وجود دارد این تنوع ممکن است ناشی از افزایش فعالیت‌های

نشان داد. اثر متقابل سال و تیمارهای آزمایشی نیز بر هیچ یک از صفات مورد اندازه‌گیری معنی‌دار نبود. نتایج تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌های برخی ویژگی‌های رویشی و زایشی نارنگی انشو میاگاوا در سه سال آزمایش به ترتیب در جدول‌های ۶ و ۷ نشان داده است. این نتایج نشان می‌دهد عامل تیمار و اثر متقابل سال و تیمار تأثیر معنی‌داری بر تعداد گل، تشکیل میوه و تعداد نهایی میوه نداشت اما عامل سال بر تعداد گل، درصد تشکیل میوه و تعداد برگ جدید درختان تأثیر معنی‌داری در سطح ۵ درصد نشان داد (جدول ۶). در جدول ۸، میانگین‌های عملکرد درختان نارنگی انشو میاگاوا با محلول‌پاشی تیمارهای مختلف طی سه سال آزمایش را نشان داده است. نتایج نشان می‌دهد که عامل سال تأثیر معنی‌داری بر عملکرد درختان داشت در مقابل، تأثیر تیمارهای مختلف محلول‌پاشی و نیز اثر متقابل عامل‌های مختلف تأثیر معنی‌داری بر عملکرد درختان طی دوره آزمایش نشان ندادند. به طور کلی نتایج این آزمایش نشان داد که تفاوت آماری معنی‌داری در میزان عملکرد درختان در تیمارهای شاهد، نیتروژن معادل و آمینواسید وجود نداشت (جدول ۸).

زمانی بسیار حیاتی در شروع جهش‌های رشدی اوایل فصل رشد متحرک می‌شود علی‌رغم این حقیقت که پرولین یک اسید آمینه غنی از نیتروژن نیست و حدود ۱/۴۶ درصد نیتروژن دارد (Moreno and Garcia-Martinz, 1984). نتایج گزارش‌های Ruiz و همکاران (۲۰۰۱) نیز نشان داد که ریزش گل‌ها و همچنین ریزش اولیه میوه‌چه‌ها (موج اول ریزش) در درختان واشگتن ناول ناشی از کمبود و قابلیت فراهمی کربوهیدراتها نیست بلکه ناشی از محدودیت فراهمی برخی عناصر غذایی از جمله نیتروژن است به طوری غلظت نیتروژن از مرحله شکستن جوانه‌ها تا مرحله شکوفایی در برگ‌ها کاهش می‌یابد. گزارش‌های این پژوهشگران نیز با نتایج این آزمایش مطابقت دارد.

نتایج تأثیر محلول‌پاشی اسیدهای آمینه در تعداد گل، درصد تشکیل میوه، درصد نهایی میوه و تعداد برگ‌های جدید نارنگی انشو میاگاوا نشان داد که تیمارهای مختلف تأثیر معنی‌داری بر تعداد گل، درصد تشکیل میوه و تعداد نهایی میوه‌ها در زمان برداشت به ازای هر درخت نداشت اما بر تعداد برگ‌های جدید تأثیر معنی‌دار

جدول ۶- تجزیه واریانس تأثیر اسیدهای آمینه در زمان گلدهی در برخی ویژگی‌های رویشی و زایشی نارنگی انشو میاگاوا
Table 6. Analysis of variance of the effect of amino acids at flowering time on some vegetative and reproductive characteristics of Miyagawa satsuma mandarin

| میانگین مربعات mean squares | | | | درجه آزادی d.f. | منابع تغییرات Resource changes |
|--|--------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|--------------------|-----------------------------------|
| تعداد برگ جدید Number of new leaves | میوه نهایی (درصد) Fruit (%) | تشکیل میوه (درصد) Fruit set (%) | تعداد گل Number of flowers | | |
| 15681* | 14* | 330* | 8231* | 2 | سال year |
| 2710 ^{ns} | 44 ^{ns} | 48 ^{ns} | 1457 ^{ns} | 6 | خطا error |
| 4419* | 17 ^{ns} | 17 ^{ns} | 487 ^{ns} | 2 | تیمار treatments |
| 234 ^{ns} | 20 ^{ns} | 39 ^{ns} | 2792 ^{ns} | 4 | سال×تیمار Treatment × year |
| 961079 | 25 | 76 | 3348 | 12 | خطا error |

ns, *: به ترتیب بدون تأثیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد.

ns, *: nonsignificant and significant at 5% possibility levels, respectively.

جدول ۷- تأثیر محلول پاشی اسیدهای آمینه در زمان گلدهی برخی ویژگی‌های رویشی و زایشی درختان نارنگی انشو میاگاوا
Table 7. Effect of foliar spraying of amino acids at flowering time on some vegetative and reproductive characteristics of Miyagawa satsuma mandarin

| تعداد برگ جدید Number of new leaves | میوه نهایی (درصد) Fruit (%) | تشکیل میوه (درصد) Fruit set (%) | تعداد گل Number of flowers | منابع تغییرات Resource changes |
|--|--------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|--|
| 98.9b | 2.8 b | 7.6 b | 163.4 a | سال اول first year |
| 105.6 a | 4.7 a | 11.4 a | 155.1 ab | سال دوم second year |
| 111.4 a | 4.4 a | 10.7 a | 146.1 b | سال سوم third year |
| 101.3 b | 3.8 a | 10.2 a | 154.8a | شاهد controls |
| 107.1 ab | 4.0 a | 10.0 a | 152.0a | اسید آمینه یک در هزار (w/v) Amino acid (1grli-1) |
| 113.7 ^a | 3.8 ^a | 9.2 ^a | 153.1 ^a | اسید آمینه سه در هزار (w/v) Amino acid (3grli ⁻¹) |

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

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

جدول ۸- تأثیر محلول پاشی اسیدهای آمینه در زمان گلدهی بر عملکرد درختان نارنگی انشو میاگاوا
Table 8. Effect of foliar spraying of amino acids at flowering time on the yield of Miyagawa satsuma mandarin trees

| عملکرد (کیلوگرم به ازای هر درخت) Yield (kg tree ⁻¹) | تیمارها treatments | منابع تغییرات Resource changes |
|--|--|---|
| 57.6 ^b | 1 | سال year |
| 65.3 ^a | 2 | |
| 59.6 ^b | 3 | |
| 57.9 ^a | شاهد controls | تیمار محلول پاشی Foliar spray treatments |
| 62.9 ^a | اسید آمینه یک در هزار (w/v) Amino acid (1grli ⁻¹) | |
| 61.3 ^a | اسید آمینه سه در هزار (w/v) Amino acid (3grli ⁻¹) | |

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

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

تحت تأثیر سال قرار نگرفت. مقایسه میانگین صفات کیفی میوه نشان می‌دهد که وزن میوه‌ها همچنین میزان قندهای جامد محلول^۱ (TSS)، اسید قابل تیتراسیون^۲ (TA) و درصد عصاره میوه در سال اول نسبت به سال‌های دوم و سوم آزمایش به‌طور معنی‌داری کمتر بود. نتایج غلظت نیتروژن در برگ درختان ۳۰ و ۶۰ روز پس از محلول پاشی در سه سال متوالی نشان می‌دهد که در سال‌های مختلف غلظت نیتروژن برگ درختان تفاوت معنی‌داری با هم نداشتند. مقایسه میانگین غلظت نیتروژن در تیمارهای مختلف محلول پاشی نشان می‌دهد که محلول پاشی اسیدهای آمینه، تأثیر معنی‌داری بر غلظت نیتروژن برگ نداشت (جدول‌های ۹ و ۱۰).

نتایج تأثیر محلول پاشی اسیدهای آمینه در وزن متوسط، درصد عصاره، ضخامت پوست میوه، مواد جامد محلول، اسیدیته قابل تیتراسیون و شاخص برداشت میوه نارنگی انشو میاگاوا نشان داد که تیمارهای مختلف تأثیر معنی‌داری بر وزن متوسط، درصد عصاره، ضخامت پوست میوه، اسیدیته قابل تیتراسیون و شاخص برداشت نداشتند. درصد مواد جامد محلول عصاره میوه تحت تأثیر تیمارهای محلول پاشی قرار گرفت و این تأثیر از نظر آماری در سطح پنج درصد معنی‌دار بود. تأثیر سال‌های آزمایش بر وزن متوسط، درصد عصاره، مواد جامد محلول، اسیدیته قابل تیتراسیون از نظر آماری در سطح یک درصد معنی‌دار بود اما ضخامت پوست و شاخص برداشت میوه،

² Titratable acid

¹ Total soluble solid

جدول ۹- تأثیر محلول‌پاشی اسیدهای آمینه در زمان گلدهی در غلظت نیتروژن برگ درختان نارنگی انشو میاگاوا
 Table 9. Effect of foliar spraying of amino acids at flowering time on leaf nitrogen concentration of Miyagawa satsuma mandarin trees

| منابع تغییرات Resource changes | | N نیتروژن (%)(درصد) | |
|--|----------|---|---|
| | | ۳۰ روز پس از محلول‌پاشی 30 days after foliar spray | ۶۰ روز پس از محلول‌پاشی 30 days after foliar spray |
| 1 | | 2.45 ^a | 2.56 ^a |
| 2 | | 2.39 ^a | 2.53 ^a |
| 3 | سال year | 2.43 ^a | 2.49 ^a |
| شاهد controls | | 2.38 ^a | 2.51 ^a |
| اسید آمینه یک در هزار (w/v) Amino acid (1g/l ¹) | | 2.39 ^a | 2.52 ^a |
| اسید آمینه سه در هزار (w/v) Amino acid (3g/l ¹) | | 2.43 ^a | 2.54 ^a |

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

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

بود. نتایج این پژوهش نشان داد که گلیسین بیشترین جذب برگی داشت و پس از آن آلانین قرار داشت و مقدار جذب برگی دیگر اسید آمینه‌های مصرفی بسیار پایین بود. با افزایش وزن مولکولی اسیدهای آمینه، میزان جذب آنها کاهش یافت و به طور کلی رابطه منفی بین وزن مولکولی و جذب وجود داشت. همچنین نتایج نشان داد که در اسید آمینه‌های با وزن مولکولی بیشتر از ۱۳۰ گرم بر مول، میزان جذب بسیار پایین بود (Furuya and Umemiya, 2002). راندمان و ویژگی‌های جذب هر اسید آمینه عمدتاً به وزن مولکولی آنها بستگی دارد البته برخی فاکتورهای دیگر از جمله اندازه مولکول، توزیع بار^۱، قابلیت تبخیر^۲، حلالیت و قابلیت جذب^۳ اسیدهای آمینه مختلف در نفوذشان از غشاهای کوتیکولی نقش دارند. گزارش‌های Furuya و Umemiya (2002) در مورد نفوذ برگی اسیدهای آمینه آلانین، آرچنین، آسپاراژین، آسپاراتیک اسید، گلوتامین، گلیسین، لیوسین، لیزین، میتونین، فنیل آلانین، پرولین، سرین و تریپتوفان نشان داد که سرعت جذب دو اسید آمینه آبدوست^۴ آرچنین و لیزین بیشتر از دیگر اسیدهای آمینه بود و دلیل آن را بار مثبت این اسیدهای آمینه گزارش کردند که به صورت کاتیون به آسانی به کوتیکول نفوذ می‌کنند. در مورد قابلیت جذب اسیدهای آمینه توسط ریشه اطلاعات زیادی در دسترس نیست نتایج بررسی جذب ۲۲ اسید آمینه توسط ریشه نشان داد که اسیدهای آمینه آرچنین، گلوتامین، سیترولین و آسپاراژین تأثیری مانند نیترات یا بیشتر از نیترات داشتند (Mori et al., 1985). نتایج برخی پژوهش‌ها نشان داده است برخی اسیدهای آمینه از جمله آرچنین تحت شرایط محیط سرد و شرایط نوری کم می‌تواند به عنوان منبع کربن عمل کنند اما مقدار کربن فراهم شده

نتایج این پژوهش نشان داد که به‌طور کلی محلول‌پاشی اسیدآمینه در سطوح مختلف تأثیر معنی‌داری بر صفات مورد بررسی از جمله عملکرد، وزن میوه و صفات کیفی میوه نشان نداشت. تنها فاکتوری که در این آزمایش بر بیشتر صفات مورد بررسی تا حدودی مؤثر بود فاکتور سال بود. با بررسی داده‌های هواشناسی می‌توان دید که سال اول آزمایش به نسبت سال‌های دوم و سوم کم باران‌تر و گرم‌تری بود از این‌رو با وجود تعداد گل بیشتر در بهار سال اول، درصد تشکیل میوه‌چه و درصد میوه نهایی در این سال، کاهش معنی‌داری به نسبت سال‌های دوم و سوم نشان داد. همچنین وزن میوه در سال اول، کاهش معنی‌داری نسبت به سال‌های دوم و سوم نشان داد. از طرف دیگر، گزارش‌های متعددی مبنی بر تأثیر مثبت نیتروژن بر صفات کمی و کیفی ارقام مختلف مرکبات موجود است ولی در این آزمایش مقدار نیتروژن موجود در اسیدآمینه یک و سه در هزار یا نفوذ آن به داخل برگ برای تأثیر نیتروژن بر صفات مورد بررسی کافی نبود و سطوح مختلف اسیدآمینه تفاوت معنی‌داری با تیمار شاهد نشان ندادند.

نتایج محلول‌پاشی برای مقایسه نفوذ برگی اوره، نیترات و یازده اسید آمینه مختلف آلانین، آرچنین، آسپاراژین، آسپاراتیک اسید، گلوتامین، گلیسین، لیوسین، لیزین، میتونین، فنیل آلانین، پرولین، سرین و تریپتوفان به ترتیب به وزن مولکولی ۱۷۴/۲، ۱۳۲/۱، ۱۰۵/۱ و ۲۰۴/۲ گرم بر مول در درختان هلو نشان داد میانگین جذب اسیدهای آمینه مختلف کمتر از ۲۰ درصد میانگین جذب اوره بود. همچنین میانگین جذب همه اسید آمینه‌های مصرفی کمتر از نیترات

³ Adsorbability

⁴ Hydrophilic

¹ Charge partition

² Volatility

(اسیدهای آمینه) است نتایج جذب برگی اوره، سولفات آمونیم، نیترات پتاسیم و اسیدهای آمینه به عنوان منابع نیتروژن نشان داد که اوره بیشترین جذب داشت و در مقابل اسیدهای آمینه و نیترات از منبع نیترات پتاسیم کمترین جذب برگی داشتند (Stiegler et al., 2013).

با سه محلول پاشی متوالی آن کمتر از ۵ درصد مقدار کربن فراهم شده از فتوسنتز است؛ بنابراین اسیدهای آمینه به طور کلی به عنوان یک منبع ضعیفی برای کربن و نیتروژن است. در مقابل نتایج پژوهشی مختلف نشان داده است اوره مهم‌ترین و مؤثرترین منبع کودی نیتروژن برای محلول پاشی برگی در مقایسه دیگر منابع معدنی نیتروژن (سولفات آمونیم و نیترات آمونیم) و منابع آلی نیتروژن

جدول ۱۰- تأثیر محلول‌پاشی اسیدهای آمینه در زمان گلدهی بر برخی ویژگی‌های میوه نارنگی انشو میاگوا

Table 10. Effect of foliar spraying of amino acids at flowering time on some quality characteristics of Miyagawa satsuma mandarin trees fruit

| شاخص برداشت TSS/TA | اسیددیده قابل تیتراسیون (درصد) TA (%) | مواد جامد محلول (درصد) TSS (%) | ضخامت پوست (میلی‌متر) Peel thick | عصاره (درصد) Extract (%) | وزن میوه (گرم) Fruit weight (gr) | منابع تغییرات Resource changes |
|-----------------------|---|--------------------------------------|--|-----------------------------------|---|--|
| 7.05 ^a | 1.26 ^b | 8.89 ^b | 2.62 ^a | 44.86 ^b | 129.6 ^b | 1 |
| 6.94 ^a | 1.39 ^a | 9.66 ^a | 2.69 ^a | 66.02 ^a | 145.8 ^a | 2 |
| 6.81 ^a | 1.34 ^a | 9.13 ^a | 2.71 ^a | 64.89 ^a | 146.2 ^a | 3 |
| 6.91 ^a | 1.28 ^a | 8.85 ^b | 2.73 ^a | 57.17 ^a | 136.7 ^a | شاهد controls |
| 6.98 ^a | 1.33 ^a | 9.29 ^a | 2.70 ^a | 56.98 ^a | 139.9 ^a | اسید آمینه یک در هزار (w/v) Amino acid (1grli ⁻¹) |
| 6.69 ^a | 1.34 ^a | 8.97 ^{ab} | 2.57 ^a | 58.48 ^a | 138.9 ^a | اسید آمینه سه در هزار (w/v) Amino acid (3grli ⁻¹) |

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

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

غلظت‌های استفاده‌شده در پژوهش حاضر، تأثیر قابل‌توجهی در غلظت نیتروژن، تشکیل میوه، عملکرد و کیفیت میوه درختان نارنگی انشو نداشت.

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، غلظت نیتروژن برگ درختان نارنگی انشو میاگاوا و پرتقال تامسون ناول با شروع شکستن جوانه‌ها شروع به کاهش کرد و در مرحله گلدهی به حداقل رسید که نشان‌دهنده محدودیت و نیاز نیتروژن در مرحله گلدهی و تشکیل میوه (مرحله اول ریزش اندام‌های زایشی) است. از طرفی نتایج محلول‌پاشی اسیدهای آمینه در مرحله گلدهی نشان داد که محلول‌پاشی اسیدهای آمینه تأثیر معنی‌داری در کاهش ریزش گل و میوه‌چه‌ها، افزایش تشکیل میوه، غلظت نیتروژن برگ و افزایش عملکرد درختان نارنگی انشو میاگاوا نداشت؛ بنابراین براساس نتایج این آزمایش محلول‌پاشی اسیدهای آمینه برای درختان مرکبات توصیه نمی‌شود. لذا در پایان پیشنهاد می‌گردد از توصیه و ترویج بدون پشتوانه علمی مصرف اسیدهای آمینه برای درختان میوه به ویژه درختان مرکبات و ایجاد هزینه اقتصادی برای باغ‌داران اجتناب گردد.

تشکر و قدردانی

از همکاران محترم بخش تحقیقات خاک و آب مازندران، باغداران منطقه، کارشناسان ایستگاه تحقیقات باغبانی قائم‌شهر و کارشناسان شرکت دشت ناز ساری که نهایت همکاری در انجام تجزیه‌های آزمایشگاهی و کارهای میدانی این پژوهش داشتند تشکر و قدردانی می‌گردد.

تغییرات میزان پروتئین و اسیدهای آمینه برگ‌های درختان پرتقال تامسون ناول در طی جهش‌های رشد سرشاخه‌ها اوایل فصل و گلدهی نشان داد که میزان پروتئین برگ‌ها کاهش یافت و سپس در پایان جهش‌های رشدی بهار و تابستان به تدریج ترمیم شد ارزیابی این روند تغییرات نشان داد که بخش اعظم پروتئین‌های برگ‌ها در تحرک مجدد نیتروژن در طی این دوره مشارکت دارند (Moreno et al., 1984; Sadka et al., 2019). گزارش‌های پژوهشی نشان داد است که در درختان پرتقال تامسون ناول و نارنگی انشو به ترتیب تنها حدود ۱۵ و ۱۰ درصد نیاز نیتروژنی اندام‌های در حال رشد اوایل بهار آنها از کوددهی خاکی اوایل فصل تأمین می‌شود بنابراین نیتروژن ذخیره در اندام‌های مختلف به ویژه برگ‌ها حدود ۸۵ تا ۹۰ درصد نیاز نیتروژنی اندام‌های رویشی و زایشی در حال رشد اوایل فصل را تأمین می‌کند (Kubota, 1977). به طور کلی کربوهیدرات‌ها و نیتروژن ذخیره برای تأمین انرژی و فراهمی بلوک‌های ساختمانی جهت رشد و توسعه اندام‌های رویشی و زایشی درختان میوه در شروع فصل رشد در بهار ضروری هستند قبل از این که فتوسنتز و جذب نیتروژن از ریشه قابلیت تأمین این مواد غذایی برای اندام‌های در حال توسعه را داشته باشد. نتایج پژوهشی نشان داده است که عملکرد درختان میوه در سال بعد بیشتر به مقدار نیتروژن ذخیره (تا کربوهیدرات‌های ذخیره) است و چگونگی افزایش نیتروژن ذخیره درختان یکی از مهم‌ترین بخش‌های مدیریت باغ است مصرف خاکی نیتروژن و محلول‌پاشی اوره در پاییز موجب افزایش ذخیره نیتروژن می‌شود و در نتیجه بهبود رشد، گلدهی، افزایش تشکیل میوه و عملکرد درختان میوه در سال بعد است (Cheng and Robinson, 2004). علیرغم استفاده روزافزون از اسیدهای آمینه در کشاورزی، بسیاری از جوامع علمی آن را فاقد ارزیابی علمی دقیقی می‌دانند، فرض بر این است که گیاهان می‌توانند اسیدهای آمینه و پپتیدها را جذب کنند. گزارش شده که ریشه گیاه می‌تواند اسیدهای آمینه نشان‌دار شده را جذب کند (Miller et al., 2007; Nacry et al., 2013). گزارش‌هایی هم مبنی بر جذب برگی این مواد موجود است (Maini., 2006; Stiegler et al., 2013; Rahman, 2022). ولی شواهد مستقیمی هنوز وجود ندارد که سهم قابل‌توجهی در تغذیه گیاه داشته باشند (Nasholm et al., 2009). به طور کلی اسیدهای آمینه انتخاب سختی برای جذب برگی هستند، زیرا اسیدهای آمینه اندازه مولکولی بسیار بزرگی دارند و جذب برگی آنها پایین است (Sauheitl et al., 2009) بنابراین برای جذب برگی اسیدهای آمینه، در شرایط میدانی بسیار پایین است که این‌ها با

References



1. Agusti, M., Garcia-Mari, F., Guardiola, J.L. 1982. The influence of flowering intensity on the shedding of reproductive structures in sweet orange. *Sci. Hort.* 17: 345-352.
2. Al-Akashy, H., Al-Hamidawi, M. and Al-Abbasi, B., 2020. Effect of spraying organic fertilizer, nano processor with boron in the growth and productivity of *Citrus Limon* L. trees. *Plant Archives*. 20 (2): 3122-3125.
3. Ardebili, Z.O., Moghadam, A.R.L., Ardebili, N. O., Pashaie, A.R., 2012. The induced physiological changes by foliar application of amino acids in Aloe vera L. plants. *PlantOmics*. 5: 279-284.
4. Asadi Kangarshahi, A. and Akhlaghi Amiri, N. 2025. Management of Nitrogen Fertilization in Citrus Orchards - a review. *Land Management*, 11 (2): 209-228. DOI: 10.22092/lmj.2023.362505.333. (In persian)
5. Asadi Kangarshahi, A. and Akhlaghi Amiri, N. 2019. *Nutrition management of citrus trees*. Agricultural Extension and Education Publications. (In persian)
6. Asadi Kangarshahi, A. and Akhlaghi Amiri, N. 2014. *Advanced and Applied Citrus Nutrition*, (I). Agricultural Extension and Education Publications. (In persian)
7. Bastam, N., Baninasab, B. and Ghobadi. C., 2013. Interactive effects of ascorbic acid and salinity stress on the growth and photosynthetic capacity of pistachio (*Pistacia Vera* L.) seedlings. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 88: 610-616.
8. Bashour, I. and Sayegh, A.A. 2007. *Methods of Analysis for Soils of Arid and Semi-Arid Regions*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. P. 49-53.
9. Biernath, C., Fischer, H., Kuzyakov, Y., 2008. Root uptake of N-containing and N-free low molecular weight organic substances by maize: a 14 C/15N tracer study. *Soil Biol. Biochem.* 40: 2237-2245.
10. Bremner, J.M. 1996. Total Nitrogen. P.1085-1122. In: D. L. Sparks et al. (eds.) *Methods of soil analysis*. American Society of Agronomy, Madison, WI.
11. Caronia, A., Gugliuzza, G. and Inglese, P., 2010. Influence of l-proline on *Citrus sinensis* (L.) [New Hall and Tarocco Scire] fruit quality. *Acta Horticulture*. 884: 423-426.
12. Cheng, L. and Robinson, T.L. 2004. Management of nitrogen and carbohydrate reserves to improve growth and yield of apple trees. *Fruit Quarterly*. 12: 19-22.
13. Cohen, Y., Gisi, U., 1994. Systemic translocation of 14C-dl-3-aminobutyric acid in tomato plants in relation to induced resistance against *Phytophthora infestans*. *Physiol. Mol. Plant Pathol.* 45: 441-456.
14. Copping, L.G., Menn, J.J., 2000. Biopesticides: a review of their action, applications and efficacy. *Pest Manag. Sci.* 56: 651-676.
15. Corona, J.C., 1994. Relationship of polyamines to fruit set and growth of the Washington navel orange. MS thesis, University of California Riverside.
16. Du Jardin, P., 2012. The science of biostimulants and bibliographic analysis. (Final report for EU). Contract 30-CEO455515/00-96. p. 37.
17. El-Sayed, O.M., El Gammal, O.H.M and Salama, A.S.M., 2014. Effect of proline and tryptophan amino acids on yield and fruit quality of Manfalouty pomegranate variety. *Scientia Horticulturae*. 169: 1-5.
18. Furuya, s. and Umemiya, Y. 2002. The influence of chemical forms on foliar applied nitrogen absorption for peach trees. *Acta Hort.* 594: 97-103.
19. Guardiola, J.L., Garcia-Mari, F. and Agusti, M. 1984. Competition and fruit set in the Washington navel orange. *Physiol. Plantarum*. 62: 297-302.
20. Gomez-Cadenas, A., Mehouchi, J., Tadeo, F.R., Primo-Millo, E. and Talon, M., 2000. Hormonal regulation of fruitlet abscission induced by carbohydrate shortage in citrus. *Planta*. 210: 636-643.
21. Hanafy Ahmed, A.M.H., Khalil, M.K., Abd El-Rahman, A.M., Hamed, N.A.M. 2012. Effect of zinc, tryptophan and indol acetic acid on growth, yield and chemical composition of Valencia orange trees. *J. Appl. Sci. Res.* 8 (2): 901-914.
22. Iglesias, D.J., Cercós, M., Colmenero-Flores, J.M., Naranjo, M.A., Ríos, G., Carrera, E., Ruiz-Rivero, O., Lliso, I., Morillon, R., Tadeo, F.R. and Talon, M., 2007. Physiology of citrus fruiting. *Braz. Journal of Plant Physiology*. 19 (4): 333-362.
23. Ilie, A.V., Petrisor, C. and Hoza, D., 2017. Influence of foliar application of amino acids to yield and quality attributes of apple.

- Journal of Horticulture, Forestry and Biotechnology. 21(3): 104- 107.
24. Kamiab, F., Heidari Salehabad, M. and Zamani Bahramabadi, E., 2015. Evaluation the effects of foliar treatments of Polyamines and some organic acids on quantitative and qualitative traits in some pistachio cultivars. *Journal of Nuts*. 6 (2): 131-142.
 25. Khan, A.S., Munir, M., Shaheen, T., Tassarar, T., Rafiq, M.A., Anwar, R., Rehman, R.N.U., Hasan, M.U. and Malik, A.U., 2022. Supplemental foliar applied mixture of amino acids and seaweed extract improved vegetative growth, yield and quality of citrus fruit. *Scientia Horticulturae*. 296: 110-115. doi.org/10.1016/j.scienta.2022.110903.
 26. Khuong, T., Zheng, Y., Chao, C. and Lovatt, C., 2010. Foliar applied tryptophan a precursor of IAA biosynthesis, increases fruit set and fruit size of citrus. In *Proceedings of the 37th Annual Meeting of the Plant Growth Regulation Society of America*, Portland, Oregon, USA, (pp. 97-101).
 27. Kolomazník, K., Pecha, J., Friebrov_a, V., Jan_a_cov_a, D., Va_sek, V., 2012. Diffusion of biostimulators into plant tissues. *Heat. Mass Transf.* 48: 1505–1512.
 28. Kimball, D.A. (1991). *Citrus Processing: quality control and technology*. Springer Science, New York.
 29. Kubota, S. 1977. Location and forms of reserve nitrogen available for sprouting and initial growth of spring shoots in satsuma mandarin. *JARQ*. 11: 169-172.
 30. Maini, P., 2006. The experience of the first biostimulant, based on amino acids and peptides: a short retrospective review on the laboratory researches and the practical results. *Fertilitas Agrorum*. 1: 29-43.
 31. Mazhar, M. S., Anwar, R. and Maqbool, M., 2007. A review of alternate bearing in citrus. In *Proceedings of International Symposium on Prospects of Horticultural Industry in Pakistan*, (pp. 143-149).
 32. Miller, A.J., Fan, X., Shen, Q. and Smith, S.J., 2007. Amino acids and nitrate as signals for the regulation of nitrogen acquisition. *Journal of Experimental Botany*. 59: 11–119.
 33. Moreno, J. and Garcia-Martinez, J.L. 1984. Nitrogen accumulation and mobilization in citrus leaves throughout the annual cycle. *Physiol. Plant*. 61: 429-434.
 34. Moreno, J. and Garcia-Martinez, J.L. 1984. Seasonal variation of nitrogenous compounds in the xylem sap of citrus. *Physiol. Plant*. 59: 669-675.
 35. Mori, S., Nishizawa, N., Uchino, H., Sago, F., Suzuki, S. and Nishikawa, A. 1985. Alleviation effect of Arginine on artificially reduced grain yield of NH_4^+ or NO_3^- fed rice. *Soil Sci. Plant Nutr.* 31: 55-67.
 36. Nacry, P., Bouguyon, E. and Gojon, A., 2013. Nitrogen acquisition by roots: physiological and developmental mechanisms ensuring plant adaptation to a fluctuating resource. *Plant Soil*. 370: 1–29.
 37. Nasholm, T., Kielland, K. and Ganeteg, U., 2009. Uptake of organic nitrogen by plants Torgny. *New Phytologist*. 182: 31-48.
 38. Otero, V., Barreal, M.E., Merino, A., Gallego, P.P., 2006. Calcium fertilization in a kiwifruit orchard. *Acta Hort*. 753, 515–520.
 39. Pecha, J., F€urst, T., Kolomazník, K., Friebrov_a, V., Svoboda, P., 2011. Protein biostimulant foliar uptake modeling: the impact of climatic conditions. *AICHe J*. 58, 2010–2019.
 40. Pillitteri, L.J., Bertling, I., Khuong, T., Chao, C.T. and Lovatt, C.J., 2010. Foliar applied tryptophan increases total yield and fruit size of navel orange and clementine mandarin. *Acta Horticulturae*. 884: 99.
 41. Polo, J., Barroso, R., Rodenas, J., Azcon-Bieto, J., Caceres, R., Marf, O., 2006. Porcine hemoglobin hydrolysate as a biostimulant for lettuce plants subjected to conditions of thermal stress. *HortTechnology* 16, 483–487.
 42. Rahman, M.M.A. 2022. Effect of using biostimulants and foliar spraying of anti-stressor for counteract the negative effects of climate changes on growth and fruiting of Balady mandarin trees. *SVU-International Journal of Agricultural Sciences*. 4(1): 153-167.
 43. Rai, V.K. 2002. Role of amino acids in plant responses to stresses. *Biologia Plantarum*, 45 (4), pp. 481-487.
 44. Ruiz, R., Garcia-Luis, A., Monerri, C. and Guardiola, J.L. 2001. Carbohydrate availability in relation to fruitlet abscission in citrus. *Annals of Botany*. 87: 805-812. doi: 10.1006/anbo.2001.1415.
 45. Ruiz, R. and Guardiola, J.L. 1994. Carbohydrate and mineral nutrition of fruitlets in relation to growth and abscission. *Physiologia Plantarum*. 90: 27-36.

46. Sadka, A., Shlizerman, L., Kamara, I. and Blumwald, E. 2019. Primary metabolism in citrus fruit as affected by its unique structure. *Frontiers in Plant Science*. 10: 1-14.
47. Sanz, A., Monerri, C., Gonzalez-Ferrer, J. and Fuardiola, J.L. 1987. Changes in carbohydrates and mineral elements in citrus leaves during flowering and fruit set. *Physiol. Plantarum*. 69: 93-98.
48. Sauheitl, L., Glaser, B. and Weigelt, A., 2009. Uptake of intact amino acids by plants depends on soil amino acid concentrations. *Environmental and Experimental Botany*. 66: 145-152.
49. Schimel, J.P., Chapin III, F.S., III, 1996. Tundra plant uptake of amino acid and NH₄ nitrogen in situ: plants complete well for amino acid N. *Ecology* 77, 2142-2147.
50. Shehata, S.A., Abdel-Azam, H.S., El-Yazied, A.A., El-Gizawy, A.M., 2011. Effect of foliar spraying with amino acids and seaweed extract on growth chemical constitutes, yield and its quality of celeriac plant. *Eur. J. Sci. Res.* 58, 257-265.
51. Stiegler, J.C., Richardson, M.D., Karcher, D.E., Roberts, T.L. and Norman, R.J., 2013. Foliar absorption of various inorganic and organic nitrogen sources by creeping bentgrass. *Crop Science*. 52: 1148-1152.
52. Tazima, Z. H., Neves, C. S. V. J., Yada, I. F. U. and Junior, R. P. L., 2013. Performance of 'Okitsu' Satsuma Mandarin on nine rootstocks. *Scientia Agricola*. 7(6): 422-427.
53. Valiente, J.I. and Albrigo, L.G., 2004. Flower bud induction of sweet orange trees (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck): effect of low temperatures, crop load, and bud age. *Journal of American Society for Horticultural Science*. 129: 158-164.
54. Vranova, V., Rejsek, K., Skene, K.R. and Formanck, P., 2011. Non-protein amino acids: plant, soil and ecosystem interactions. *Plant Soil*. 342: 31-48.
55. Wu, G., 2013. *Amino acids: biochemistry and nutrition*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 458 P.
56. Zhao, Y., Xiong, H., Luo, Y., Hu, B., Wang, J., Tang, X., Wang, Y., Shi, X., Zhang, Y. and Rennenberg, H. 2025. Long-term nitrogen fertilization alters the partitioning of amino acid between citrus leaves and fruits. *Frontiers in Plant Science*. 14: 6-14.



The Effect of Seed Coating with Biostimulants on Yield and Yield Components of Canola (*Brassica napus* L.)

Parsa Sekooti^a, Salim Farzaneh^{b*} , Abdolghayoum Gholipouri^c, Shahram Khodadadi^d, Bahman Khoshru^{e*} , and Negin Taleschian Tabrizi^f

^a Department of Crop Physiology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

^b Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

^c Department of Agronomy, Faculty of plant production, Gorgan University of Agricultural Science and Natural resources, Gorgan, Iran.

^d Sugar Beet Seed Institute (SBSI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

^e Soil and Water Research Institute (SWRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

^f Crop and Horticultural Science Research Department, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Moghan, Iran.

Article Info

Article Type

Research Article

Received

September 28, 2025

Revised

April 21, 2026

Accepted

May 02, 2026

Published online

June 17, 2026

Keywords

Germination,
Humic acid,
Hyola 50,
Seed priming,
Seaweed extract.

*Corresponding author's email

salimfarzaneh@yahoo.com
bahmankhoshru@yahoo.com

Extended Abstract

Background and Objectives: Canola (*Brassica napus* L.) is a vital global oilseed crop, critical for food security due to its high-quality edible oil and protein-rich meal. Enhancing productivity is a primary goal in modern sustainable agriculture, especially in semi-arid regions where suboptimal environmental conditions often hamper germination and seedling establishment. These early-stage stressors lead to poor crop stands, reduced seedling vigor, and ultimately lower final yields. To address these limitations, seed coating has emerged as a precise and resource-efficient method for improving seed performance. By creating a favorable micro-environment (spermosphere) and delivering beneficial substances directly to the embryo, this technique enhances establishment. Biostimulants, such as seaweed extracts (rich in phytohormones like auxins and cytokinins), humic acids (known for chelating nutrients and stimulating root development), and amino acids (essential for protein synthesis and stress tolerance), are effective additives. While their benefits in foliar applications are well-known, their efficacy and optimal concentrations via seed coating require further investigation. This study aimed to comprehensively evaluate the effects of seed priming and coating with various concentrations of humic acid, seaweed extract, and amino acids, individually and in combination, on the yield and yield components of spring canola.

Materials and Methods: A field experiment was conducted during the 2018-2019 growing season at the research farm of the University of Mohaghegh Ardabili in northwestern Iran, a region characterized by a semi-arid, cold climate. The soil was a calcareous loam (pH 7.8, EC 1.15 dS/m) with low organic matter. The experiment utilized a Randomized Complete Block Design (RCBD) with three replications. The study involved 16 distinct seed pre-treatments applied to the spring canola cultivar 'Hyola 50'. Treatments included three levels of humic acid (3, 6, and 9 g/kg seed), three levels of seaweed extract (3, 6, and 9 g/kg seed), and three levels of amino acids (2, 4, and 6 g/kg seed), alongside specific combined formulations and hydropriming controls. An aqueous slurry containing carboxymethyl cellulose (CMC) as a filler and polyvinyl acetate (PVA) as a binder was used for uniform coating via a laboratory rotary coater. Standard agronomic practices were followed throughout the season. At physiological maturity, plants were harvested to determine grain yield, biological yield, harvest index, and key yield components. Data were analyzed using SAS software (ANOVA), and means were compared using Duncan's Multiple Range Test (DMRT) at the 5% probability level.

Results: Analysis of variance revealed significant effects ($P < 0.01$) of seed treatments on grain yield, biological yield, the number of pods per plant, 1000-grain weight, and plant height. However, no statistically significant differences were observed for harvest index, pod length, and the number of seeds per pod, suggesting these traits may be less responsive to seed treatments. Grain yield was significantly impacted; the highest yield of 2185.3 kg/ha was achieved by coating seeds with 9 g/kg seaweed extract, representing a substantial 38.76% increase over the control (1574.8 kg/ha). Similarly, coating with 9 g/kg humic acid resulted in the highest biological yield (6941.3 kg/ha) and the maximum number of pods per plant (96.22), showing increases of 21.98% and 62.50% compared to the control, respectively. The 1000-grain weight was also significantly improved by 9 g/kg seaweed extract. Among the combined treatments, the specific combination of 2 g amino acid + 6 g seaweed extract + 3 g humic acid per kg seed demonstrated superior performance in improving plant height and overall yield stability compared to other combinations, highlighting synergistic effects at specific ratios.

Conclusion: This study confirms that seed coating with biostimulants is a potent strategy for enhancing spring canola productivity in semi-arid regions. The targeted application of these substances leads to significant improvements in seedling establishment, vegetative growth, and final grain yield. Application of 9 g/kg seaweed extract is specifically recommended for maximizing grain yield due to its hormonal influence, while high concentrations of humic acid (9 g/kg) are superior for boosting biomass and sink capacity, i.e., pods. The results also indicated that optimized combined treatments can further enhance plant performance. Therefore, seed coating serves as a valuable, precise tool for sustainable production. However, since this study was conducted over a single growing season, further multi-year and multi-location trials are recommended to confirm the stability and generalizability of these findings under varying climatic conditions.

Cite this article: Sekooti, P., Farzaneh, S., Gholipouri, A., Khodadadi, Sh., Khoshru, B., Taleschian Tabrizi, N., 2026. The Effect of Seed Coating with Biostimulants on Yield and Yield Components of Canola (*Brassica napus* L.). Research Article, *Journal of Soil Research*, 40 (1), pp 45-60.



DOI: <https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.370813.790>

Publisher: Soil Science Society of Iran



تأثیر پوشش‌دار کردن بذر با محرک‌های زیستی بر عملکرد و اجزای عملکرد کلزا (*Brassica napus* L.)

پارسا سکوتی^۱، سلیم فرزانه^{۲*}، عبدالقیوم قلی پوری^۳، شهرام خدادادی^۴، بهمن خوشرو^{۵*} و نگین تلسچیان تبریزی^۶

^۱ گروه فیزیولوژی گیاهان زراعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

^۲ گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

^۳ گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

^۴ مؤسسه اصلاح و تهیه بذر چغندرقد، سازمان تحقیقات، ترویج و آموزش کشاورزی، کرج، ایران.

^۵ مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

^۶ بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مغان، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۲۷

واژه‌های کلیدی

اسید هیومیک،

پرایمینگ بذر،

جوانه‌زنی،

عصاره جلبک دریایی،

هایولا ۵۰

پوشش‌دار کردن بذر کلزا با محرک‌های زیستی، روشی مؤثر برای تقویت بنیه گیاه و افزایش پتانسیل تولید است. این پژوهش با هدف ارزیابی تأثیر پوشش بذر کلزا (رقم هایولا ۵۰) با سطوح مختلف اسید هیومیک و عصاره جلبک دریایی (۳، ۶ و ۹ گرم بر کیلوگرم بذر)، اسید آمینه (۲، ۴ و ۶ گرم بر کیلوگرم بذر) به صورت جداگانه و ترکیبی و هیدروپرایمینگ انجام شد. آزمایش در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه محقق اردبیلی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۱۶ تیمار و ۳ تکرار اجرا گردید. نتایج نشان‌دهنده تأثیر معنی‌دار تیمارها بر اکثر صفات بود. بیشترین عملکرد دانه (۲۱۸۵/۳ کیلوگرم در هکتار) با کاربرد ۹ گرم عصاره جلبک دریایی به دست آمد که افزایشی معادل ۷۶/۳۸ درصد نسبت به شاهد (۱۵۷۴/۸ کیلوگرم در هکتار) داشت. همچنین، تیمار ۹ گرم اسید هیومیک منجر به ثبت بالاترین عملکرد زیستی (۶۹۴۱/۳ کیلوگرم در هکتار) و بیشترین تعداد غلاف در بوته (۹۶/۲۲ عدد) شد که به ترتیب ۲۱/۹۸ و ۶۲/۵۰ درصد بیشتر از شاهد بود. وزن هزار دانه نیز تحت تأثیر ۹ گرم عصاره جلبک دریایی بهبود یافت، اما تفاوت معنی‌داری در شاخص برداشت و تعداد دانه در غلاف مشاهده نشد. در بین تیمارهای ترکیبی، ترکیب ۲ گرم اسید آمینه + ۶ گرم عصاره جلبک + ۳ گرم اسید هیومیک عملکرد بهتری داشت؛ بنابراین، پوشش بذر با ۹ گرم عصاره جلبک دریایی جهت بهبود عملکرد کلزا توصیه می‌شود.

* ایمیل نویسنده مسئول

salimfarzaneh@yahoo.com

bahmankhosru@yahoo.com

استاد: سکوتی، پ، فرزانه، س، قلی پوری، ع، خدادادی، ش، خوشرو، ب، تلسچیان تبریزی، ن، ۱۴۰۵. تأثیر پوشش‌دار کردن بذر با محرک‌های

زیستی بر عملکرد و اجزای عملکرد کلزا (*Brassica napus* L.). مقاله پژوهشی، نشریه پژوهش‌های خاک، (۱) ۴۰، ص ۴۵-۶۰

DOI: <https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.370813.790>



مقدمه

در این راستا، فناوری‌های تیمار بذر به عنوان یک ابزار دقیق و کارآمد برای بهبود عملکرد بذر در شرایط مزرعه‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در میان این فناوری‌ها، پوشش‌دار کردن بذر^۱ یک روش هدفمند برای اعمال مقادیر دقیقی از ترکیبات مفید به طور مستقیم بر سطح بذر است (Copland and McDonald, 2008). این تکنیک نه تنها مصرف نهاده‌ها را در مقایسه با روش‌های پخش سراسری^۲ به شدت کاهش می‌دهد و اثرات زیست‌محیطی را به حداقل می‌رساند، بلکه با ایجاد یک ریزمحیط غنی در اطراف بذر، شرایطی ایده‌آل برای فرآیندهای بیوشیمیایی جوانه‌زنی فراهم می‌آورد (Windauer et al., 2007). این رویکرد امکان استفاده از ترکیبات زیست‌فعال را فراهم می‌کند که می‌توانند به طور مستقیم بر متابولیسم بذر تأثیر گذاشته و از آن در برابر شرایط نامساعد اولیه محافظت نمایند.

گذار به سمت کشاورزی پایدار، منجر به افزایش چشمگیر علاقه به استفاده از محرک‌های زیستی^۳ شده است. این ترکیبات طبیعی، با فعال‌سازی مسیرهای فیزیولوژیک و متابولیک در گیاه، به بهبود کارایی جذب مواد مغذی، افزایش تحمل به تنش‌ها و ارتقاء کیفیت محصول کمک می‌کنند (Popko et al., 2018). هیومیک اسید از طریق کبلیت کردن عناصر غذایی مختلف برای غلبه بر کمبود عناصر، رشد گیاه را افزایش می‌دهد و به دلیل داشتن ترکیبات شبه هورمونی، اثرات مفیدی بر افزایش رشد، تولید و بهبود کیفیت محصولات کشاورزی دارد (Meena, Dhanoji, & Naik, 2023). عصاره جلبک دریایی که سرشار از طیف وسیعی از ترکیبات زیست‌فعال نظیر فیتوهورمون‌ها (اکسین، سیتوکینین)، بتائین‌ها و پلی‌ساکاریدها است، به طور مستقیم فرآیندهای رشدی را تنظیم کرده و با افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی سلول‌ها، مقاومت گیاه را در برابر تنش‌های اکسیداتیو افزایش می‌دهد (Azarmehr et al., 2017). اسیدهای آمینه نیز به عنوان واحدهای بنیادین پروتئین‌ها و پیش‌ماده‌های مسیرهای متابولیکی، در سنتز هورمون‌ها، تنظیم اسمزی و فرآیندهای سیگنالینگ سلولی نقش حیاتی دارند (Faten et al., 2010).

با وجود مزایای اثبات‌شده این محرک‌ها، مرور جامع متون علمی نشان می‌دهد که اکثر قریب به اتفاق پژوهش‌های پیشین بر روش‌های محلول‌پاشی برگ‌گی یا کاربرد خاکی متمرکز بوده‌اند. به عنوان مثال، تأثیر محلول‌پاشی اسید هیومیک (Barekati et al., 2019; Rahimi et al., 2016) عصاره جلبک دریایی (Azarmehr et al., 2017; Rathore et al., 2009) و اسیدهای آمینه (Faten et al., 2010; Cerdán et

کلزا (*Brassica napus* L.) به عنوان یکی از مهم‌ترین گیاهان روغنی در سطح جهان، به دلیل دارا بودن اسیدهای چرب غیراشباع، فقدان کلسترول و کیفیت تغذیه‌ای بالای روغن آن، از جایگاه ویژه‌ای در رژیم‌های غذایی سالم برخوردار است (Shen et al., 2023). این گیاه با اختصاص دادن حدود ۸/۱۴ درصد از کل تولید جهانی دانه‌های روغنی (FAO, 2017)، نه تنها به دلیل حجم تولید، بلکه به واسطه کیفیت بی‌نظیر محصولاتش مورد توجه است. روغن کلزا با دارا بودن ترکیبی مطلوب از اسیدهای چرب، شامل مقادیر پایین اسیدهای چرب اشباع و سطح بالای اسیدهای چرب تک‌غیراشباع (اولئیک) و چندغیراشباع (امگا-۳ و امگا-۶)، به عنوان یک انتخاب سالم برای مصرف‌کنندگان مطرح است. کنجاله آن نیز، به عنوان محصول جانبی فرآیند روغن‌کشی، یک منبع پروتئینی ارزشمند برای صنعت دامپروری محسوب می‌شود. از منظر کشاورزی، کلزا به دلیل ساختار ریشه‌ای عمیق و توانایی شکستن چرخه آفات و بیماری‌ها، نقشی کلیدی در بهبود پایداری و حاصلخیزی خاک در سیستم‌های تناوب زراعی، به ویژه با غلات، ایفا می‌کند. با این حال، در بسیاری از مناطق دنیا از جمله ایران، پتانسیل عملکرد این گیاه به دلیل مواجهه با چالش‌های متعدد مدیریتی و محیطی به طور کامل محقق نمی‌شود که این امر لزوم به‌کارگیری رویکردهای نوآورانه برای افزایش بهره‌وری را ضروری می‌سازد (Ahmadi et al., 2015; Ahmadi et al., 2019).

کشاورزی مدرن با چالش دوگانه افزایش تولید برای جمعیت رو به رشد و همزمان، کاهش اثرات زیست‌محیطی و سازگاری با تغییرات اقلیمی مواجه است. افزایش فراوانی تنش‌های غیرزیستی مانند خشکی، شوری و دمای غیر متعارف، به ویژه در مراحل اولیه رشد گیاه، به یکی از اصلی‌ترین موانع تولید پایدار محصولات زراعی تبدیل شده است. مرحله جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه، به عنوان حساس‌ترین و آسیب‌پذیرترین دوره زندگی گیاه، نقشی تعیین‌کننده در تراکم نهایی بوته، یکنواختی مزرعه و در نهایت، پتانسیل عملکرد دارد. هرگونه تأخیر یا اختلال در این مرحله می‌تواند منجر به کاهش توان رقابتی گیاهچه در برابر تنش‌های غیرزیستی و زیستی از جمله علف‌های هرز و افزایش حساسیت آن به آفات و بیماری‌ها شود؛ بنابراین، راهکارهایی که بتوانند بنیه بذر را تقویت کرده و استقرار سریع و موفقیت‌آمیز گیاهچه را تضمین کنند، از اهمیت بالایی در مدیریت نوین زراعی برخوردارند.

³ Bio stimulants

¹ Seed Coating

² Broadcasting

شد. روش‌های استاندارد برای آنالیز خاک به کار رفت (Sparks et al., 2020). نتایج آزمون خاک نشان داد که خاک محل آزمایش، آهکی، دارای بافت لومی با pH قلیایی ملایم (۷/۸)، هدایت الکتریکی^۵ ۱/۱۵ دسی‌زیمنس بر متر و ۱/۲ درصد ماده آلی بود. میزان نیتروژن کل (به روش کج‌لدال)، فسفر قابل دسترس (Olsen, 1954) و پتاسیم قابل دسترس خاک (به روش استات آمونیوم) به ترتیب ۰/۱۱ درصد، ۱۲/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم و ۲۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم اندازه‌گیری شد.

طرح آزمایشی و تیمارها

آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تعداد تیمارهای آزمایشی ۱۶ عدد و شامل ترکیبی از نوع و سطوح مختلفی از ترکیبات پیش‌تیمار بذر بودند که در جدول ۱ به تفصیل شرح داده شده‌اند. بذور مورد استفاده در این تحقیق از رقم کلزای بهاره هایولا^۶ ۵۰ بودند که از موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج تهیه گردید. محرک‌های زیستی شامل اسید هیومیک (با خلوص ۷۵ درصد، محصول شرکت زیست‌فناور پارس)، عصاره جلبک دریایی (از گونه *Ascophyllum nodosum*، محصول شرکت BioAgri) و اسید آمینه (مخلوطی از ۱۸ نوع اسید آمینه آزاد نوع L، محصول شرکت آگرواکسین) بودند.

روش آماده‌سازی تیمارها

هیدروپرایمینگ

جهت انجام هیدروپرایمینگ، بذور به مدت ۲۴ ساعت در آب مقطر استریل در دمای اتاق (حدود ۲۵ درجه سانتیگراد) غوطه‌ور شدند. در طول این مدت، هوادهی ملایم با استفاده از پمپ اکواریوم برای تأمین اکسیژن انجام گرفت. این روش برای شکستن خواب بذر و فعال‌سازی فرآیندهای اولیه جوانه‌زنی بسیار مؤثر است (Heydecker and Coolbear, 1977). پس از اتمام دوره پرایمینگ، بذور از آب خارج شده و در سایه بر روی کاغذ صافی پهن شدند تا به رطوبت اولیه خود (حدود ۸-۹ درصد) بازگردند.

پوشش‌دار کردن بذر^۷

برای پوشش‌دار کردن بذر، ابتدا دوغاب^۸ پایه با حل کردن ۳ گرم کربوکسی متیل سلولز^۹ در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر به عنوان ماده پرکننده و پلی‌وینیل استات^{۱۰} در صد به عنوان

بر صفات مورفولوژیک و عملکردی گیاهان به طور گسترده گزارش شده است. با این حال، کاربرد این مواد به صورت محلول پاشی معمولاً در مراحل رویشی پیشرفته انجام می‌شود و نمی‌تواند نیازهای حیاتی گیاه در مرحله حساس جوانه‌زنی و استقرار اولیه را تأمین کند. همچنین روش‌های کاربرد خاکی نیازمند حجم بالایی از نهاده هستند که از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی چالش‌برانگیز است. تاکنون مطالعه‌ای جامع در رابطه با مقایسه کارایی تأثیر روش "پوشش‌دار کردن بذر" با استفاده از سطوح مختلف و ترکیبی این سه محرک زیستی خاص (اسید هیومیک، عصاره جلبک دریایی و اسید آمینه) بر عملکرد کمی و کیفی کلزا مشاهده نشده است. این شکاف تحقیقاتی، ضرورت بررسی کارایی این روش نوین مصرف نهاده را برجسته می‌سازد.

بر این اساس، نوآوری پژوهش حاضر در به‌کارگیری فناوری پوشش‌بذر به عنوان یک سیستم حامل برای انتقال هدفمند و کم‌حجم این محرک‌های زیستی در مرحله حیاتی جوانه‌زنی است. فرضیه اصلی این بود که قرارگیری مستقیم این ترکیبات در محیط اطراف بذر^۴ می‌تواند با فعال‌سازی سریع‌تر فرآیندهای فیزیولوژیک و تقویت استقرار اولیه، پتانسیل عملکرد را نسبت به روش‌های مرسوم افزایش دهد. لذا، این تحقیق با هدف ارزیابی جامع تأثیر سطوح مختلف اسید هیومیک، عصاره جلبک دریایی و اسید آمینه، به صورت انفرادی و ترکیبی، بر عملکرد و اجزای عملکرد کلزا از طریق روش‌های پرایمینگ و پوشش‌دار کردن بذر به اجرا درآمد.

مواد و روش‌ها

مشخصات محل و شرایط اقلیمی آزمایش

این پژوهش در سال زراعی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی، واقع در روستای کرکوق (عرض جغرافیایی ۳۸ درجه و ۱۵ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۲۰ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۳۵۰ متر از سطح دریا) به اجرا درآمد. منطقه دارای اقلیم نیمه‌خشک و سرد (بر اساس طبقه‌بندی کوپن) است. بر اساس داده‌های هواشناسی ایستگاه سینوپتیک اردبیل، میانگین دما و مجموع بارندگی در طول دوره رشد گیاه (از کاشت تا برداشت) به ترتیب ۱۸/۵ درجه سانتی‌گراد و ۱۵۵ میلی‌متر بود. جهت تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، پیش از آماده‌سازی زمین، نمونه‌برداری مرکب از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک انجام

⁸ Slurry

⁹ Carboxy methyl cellulose (CMC)

¹⁰ Poly vinyl acetate (PVA)

⁴ Spermosphere

⁵ Electrical Conductivity: EC

⁶ Hyola 50

⁷ Seed Coating

چسبانده تهیه شد. سپس، مقادیر مشخص شده از هر محرک زیستی (طبق تیمارهای جدول ۱) به دوغاب اضافه و کاملاً مخلوط گردید. بذر در یک دسته‌گاه پوشش‌دهنده بذر آزمایشگاهی^{۱۱} قرار گرفته و دوغاب به آرامی بر روی آن‌ها اسپری شد تا لایه‌ای یکنواخت تشکیل شود. این تکنیک یک روش دقیق برای اعمال مواد زیست‌فعال به بذر است (Rocha

et al., 2019). میزان مواد پوشش به گونه‌ای تنظیم شد که افزایش وزن نهایی بذر حدود ۵ درصد باشد. بذر پوشش‌دار شده سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق خشک شدند. تیمار شاهد نیز بذوری بودند که هیچ‌گونه عملیات پیش‌تیماری روی آن‌ها صورت نگرفت.

جدول ۱- تیمارهای آزمایش

Table 1. List of experimental treatments

| توضیح Explanation | تیمار Treatment |
|--|--------------------------|
| به مقدار ۲ گرم اسید آمینه در هر کیلوگرم بذر | اسید آمینه سطح ۱ |
| به مقدار ۴ گرم اسید آمینه در هر کیلوگرم بذر | اسید آمینه سطح ۲ |
| به مقدار ۶ گرم اسید آمینه در هر کیلوگرم بذر | اسید آمینه سطح ۳ |
| به مقدار ۳ گرم عصاره جلبک دریایی در هر کیلوگرم بذر | عصاره جلبک دریایی سطح ۱ |
| به مقدار ۶ گرم عصاره جلبک دریایی در هر کیلوگرم بذر | عصاره جلبک دریایی سطح ۲ |
| به مقدار ۹ گرم عصاره جلبک دریایی در هر کیلوگرم بذر | عصاره جلبک دریایی سطح ۳ |
| به مقدار ۳ گرم اسید هیومیک در هر کیلوگرم بذر | اسید هیومیک سطح ۱ |
| به مقدار ۶ گرم اسید هیومیک در هر کیلوگرم بذر | اسید هیومیک سطح ۲ |
| به مقدار ۹ گرم اسید هیومیک در هر کیلوگرم بذر | اسید هیومیک سطح ۳ |
| ۲ گرم اسید آمینه + ۳ گرم عصاره جلبک دریایی + ۳ گرم اسید هیومیک در هر کیلوگرم | ترکیب محرک‌های رشد سطح ۱ |
| ۲ گرم اسید آمینه + ۶ گرم عصاره جلبک دریایی + ۳ گرم اسید هیومیک در هر کیلوگرم | ترکیب محرک‌های رشد سطح ۲ |
| ۲ گرم اسید آمینه + ۹ گرم عصاره جلبک دریایی + ۶ گرم اسید هیومیک در هر کیلوگرم | ترکیب محرک‌های رشد سطح ۳ |
| ۲ گرم اسید آمینه + ۶ گرم عصاره جلبک دریایی + ۹ گرم اسید هیومیک در هر کیلوگرم | ترکیب محرک‌های رشد سطح ۴ |
| سطح دوم هیومیک | پرایمینگ |
| سطح دوم جلبک | پرایمینگ |
| بدون تیمار | شاهد |

تشکیل غلاف و دانه‌بندی)، وجین دستی علف‌های هرز در دو مرحله و تنک کردن بوته‌ها در مرحله ۴-۶ برگی برای رسیدن به تراکم مطلوب بود.

اندازه‌گیری صفات

در پایان فصل رشد و پس از رسیدگی فیزیولوژیک (زمانی که رنگ دانه‌ها قهوه‌ای تیره شد)، برای جلوگیری از اثرات حاشیه‌ای، دو خط میانی هر کرت با حذف ۵۰ سانتی‌متر از ابتدا و انتهای آن‌ها به عنوان سطح برداشت نهایی (نمونه‌گیری) در نظر گرفته شد. صفات زیر مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند:

عملکرد دانه

بوته‌های موجود در سطح برداشت هر کرت، برداشت و خرمن‌کوبی شدند. دانه‌ها پس از تمیز کردن، توزین شده و رطوبت آن‌ها با استفاده از رطوبت‌سنج دیجیتال اندازه‌گیری شد. عملکرد نهایی بر اساس رطوبت ۱۰ درصد محاسبه و به کیلوگرم در هکتار تبدیل گردید.

عملیات زراعی و مدیریت مزرعه

عملیات آماده‌سازی زمین شامل شخم عمیق پاییزه و دو نوبت دیسک در بهار بود. کوددهی بر اساس نتایج آزمون خاک و توصیه‌های کودی برای کلزا انجام شد (Ghanbari et al., 2013). تمامی کود فسفر (از منبع تریپل سوپرفسفات به میزان ۱۰۰ کیلوگرم P_2O_5 در هکتار) و پتاسیم (از منبع سولفات پتاسیم به میزان ۸۰ کیلوگرم K_2O در هکتار) قبل از کاشت به زمین اضافه و با دیسک با خاک مخلوط شد. کود نیتروژن (از منبع اوره به میزان ۱۵۰ کیلوگرم N در هکتار) به صورت تقسیمی، یک‌سوم در زمان کاشت و دو سوم در مرحله ساقه‌دهی^{۱۲} به صورت سرک مصرف گردید.

هر کرت آزمایشی شامل ۴ خط کاشت به طول ۴ متر و با فاصله ۳۰ سانتیمتر بین ردیف‌ها بود. فاصله بین کرت‌ها ۱ متر و فاصله بین بلوک‌ها ۲ متر در نظر گرفته شد. کاشت بذر در تاریخ ۵ اردیبهشت ۱۳۹۸ به صورت دستی و با تراکم هدف ۸۰ بوته در مترمربع انجام شد. عملیات داشت شامل ۴ نوبت آبیاری تکمیلی در مراحل کلیدی رشد (ساقه‌دهی، شروع گلدهی،

¹² Rosette stage

¹¹ Laboratory Rotary Coater

عملکرد زیستی

وزن کل بوته‌های برداشت شده (کاه و کلس + دانه) پس از خشک شدن در آون در دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت، به عنوان عملکرد زیستی ثبت و به کیلوگرم در هکتار تعمیم داده شد.

شاخص برداشت

از نسبت عملکرد دانه به عملکرد زیستی (ضربدر ۱۰۰) محاسبه شد (Gardner et al., 1985).

تجزیه و تحلیل آماری

داده‌های جمع‌آوری شده با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS (نسخه ۹/۳) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. پس از بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها با آزمون شاپیرو-ویلک، تجزیه واریانس (ANOVA) بر اساس مدل آماری طرح بلوک‌های کامل تصادفی انجام شد. مقایسه میانگین تیمارها نیز با استفاده از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار^{۱۳} در سطح احتمال ۵ درصد ($p \leq 0.05$) صورت گرفت. نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Microsoft Excel 2019 رسم شدند.

اجزای عملکرد

قبل از برداشت نهایی، ۱۰ بوته از هر کرت به صورت تصادفی انتخاب و صفاتی نظیر ارتفاع بوته، تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در غلاف (از میانگین ۱۰ غلاف از بخش‌های مختلف بوته) و طول غلاف اندازه‌گیری شد. وزن هزار دانه نیز با شمارش و توزین سه نمونه ۱۰۰۰ دانه‌ای از محصول هر کرت و محاسبه میانگین آن‌ها به دست آمد.

نتایج

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۲) نشان داد که تیمارهای مختلف پیش‌تیمار بذر اثر معنی‌داری ($P < 0.01$) بر اکثر صفات مورفولوژیک و عملکردی گیاه کلزا داشتند. به طور مشخص، صفات عملکرد دانه، عملکرد زیستی، تعداد غلاف در بوته، طول غلاف، وزن هزار دانه و ارتفاع بوته به طور معنی‌داری تحت تأثیر تیمارها قرار گرفتند. در مقابل، تفاوت آماری معنی‌داری برای صفات شاخص برداشت، تعداد دانه در غلاف و طول غلاف مشاهده نگردید ($P < 0.05$).

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر تیمارهای پوشش بذر بر عملکرد و اجزای عملکرد کلزا

Table 2. The results of analysis of variance (mean squares) of the effect of seed coating treatments on yield and yield components of rapeseed

| عملکرد دانه Seed yield | عملکرد زیستی Biological yield | شاخص برداشت Harvest index | وزن هزار دانه 1000-seed weight | غلاف در بوته Siliqua number | طول غلاف Siliqua Length | دانه در غلاف Seed number in siliqua | ارتفاع بوته Plant Height | درجه آزادی (df) | منبع تغییر (S.O.V) |
|---------------------------|----------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|----------------------------|--|-----------------------------|-----------------|-----------------------|
| 3.25×10 ⁵ | 3.49×10 ⁶ | 501.71 | 0.11 | 1373.88 | 0.03 | 8.70 | 337.35 | 2 | بلوک Block |
| 3.24×10 ^{5**} | 1.90×10 ^{6**} | 51.57 ^{ns} | 0.09** | 701.06** | 0.30 ^{ns} | 4.57 ^{ns} | 138.60** | 15 | پوشش بذر Seed coat |
| 233375.48 | 321097.63 | 58.99 | 0.02 | 128.21 | 0.09 | 2.80 | 33.25 | 30 | خطا Error |
| 15.91 | 14.80 | 25.72 | 5.53 | 17.95 | 3.77 | 7.20 | 6.76 | - | ضریب تغییرات (CV) (%) |

ns و **: به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد.

ns and ** indicate non-significant and significant at the 1% probability level, respectively.

عملکرد دانه

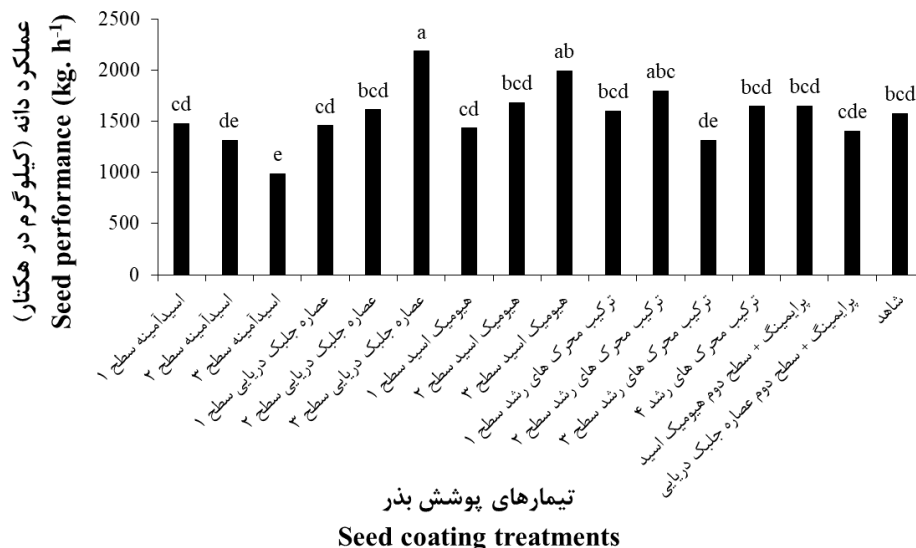
دریابی، سطح ۳ اسید هیومیک و سطح ۲ ترکیب محرک‌های رشد به ترتیب با ۲۱۸۵/۳، ۱۹۹۰/۸ و ۱۷۹۴/۱ کیلوگرم در هکتار بیش‌ترین عملکرد دانه را در بین تیمارهای آزمایشی داشتند و بین این تیمارها از نظر آماری اختلاف معنی‌داری وجود نداشت و این تیمارها به طور معنی‌داری و به ترتیب موجب افزایش ۳۸/۷۶

عملکرد دانه به عنوان شاخص نهایی، واکنش بسیار معنی‌داری به تیمارهای بذر نشان داد ($P < 0.01$). نتایج مقایسه میانگین (شکل ۱) نشان داد تیمارهای سطح ۳ عصاره جلبک

¹³ Least significant difference (LSD)

پرایمینگ هم تیمار پرایمینگ + سطح دوم اسید هیومیک از عملکرد دانه بیشتری نسبت به تیمار شاهد برخوردار بود در حالی که در ترکیب تیماری پرایمینگ + سطح دوم عصاره جلبک دریایی عملکرد دانه نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت.

درصدی، ۲۶/۴۱ درصدی و ۱۳/۹۲ درصدی عملکرد دانه نسبت به تیمار شاهد (۱۵۷۴/۸ کیلوگرم در هکتار) شدند. همچنین کم‌ترین عملکرد دانه مربوط به تیمار پوشش بذر با سطح ۳ اسید آمینه با ۹۸۶/۵ کیلوگرم در هکتار بود که موجب کاهش ۳۷/۳۵ درصدی عملکرد دانه نسبت به تیمار شاهد شد. در بین تیمارهای



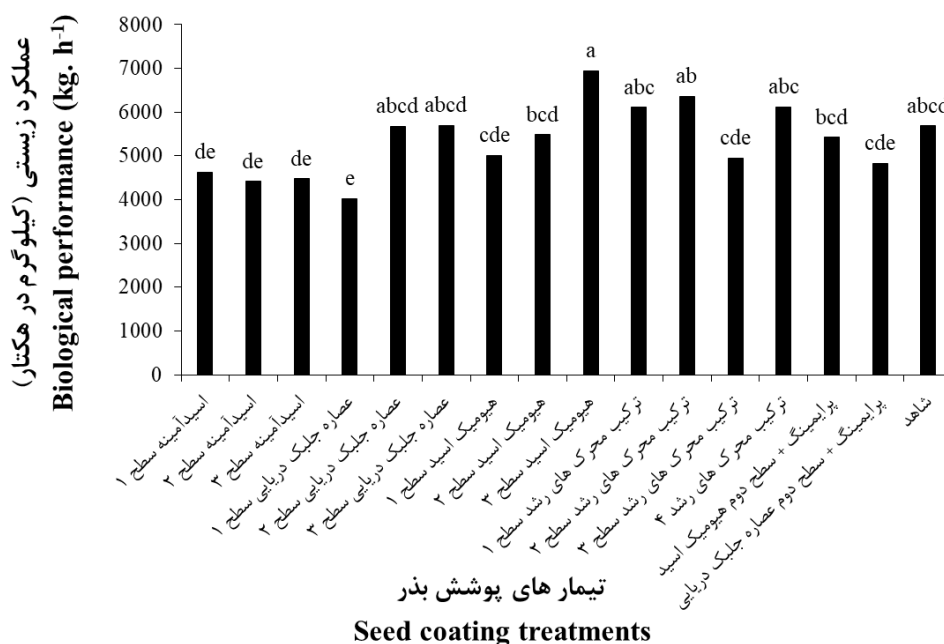
شکل ۱- تأثیر تیمارهای مختلف پوشش بذر بر عملکرد دانه در گیاه کلزا. ستون‌های دارای حروف مشترک، بر اساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، تفاوت آماری معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

Fig. 1. Effect of different seed coating treatments on seed yield of canola plants. Columns with the same letter do not have statistically significant differences based on Least significant difference test at the 5% probability level.

۱۱/۷۳ درصدی عملکرد بیولوژیک نسبت به تیمار شاهد (۵۶۹۰/۵ کیلوگرم در هکتار) شدند. کم‌ترین مقدار این صفت (۴۰۲۱/۴ کیلوگرم در هکتار) نیز در تیمار عصاره جلبک دریایی سطح ۳ ثبت گردید و موجب کاهش ۲۳/۳۳ درصدی عملکرد زیستی نسبت به تیمار شاهد شدند. همچنین در تیمارهای پرایمینگ + سطح دوم اسید هیومیک و پرایمینگ + سطح دوم عصاره جلبک دریایی نیز عملکرد زیستی نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت (شکل ۲).

عملکرد زیستی

عملکرد زیستی نیز به طور معنی‌داری تحت تأثیر تیمارها بود ($P < 0.01$). تیمار سطح ۳ اسید هیومیک و سطح ۲ ترکیب محرک های رشد به ترتیب با ۶۹۴۱/۶ و ۶۳۵۸/۵ کیلوگرم در هکتار بیش‌ترین شاخص برداشت را در بین تیمارهای مورد بررسی داشتند و بین این دو از نظر آماری اختلاف معنی‌داری وجود نداشت و به ترتیب موجب افزایش ۲۱/۹۸ و



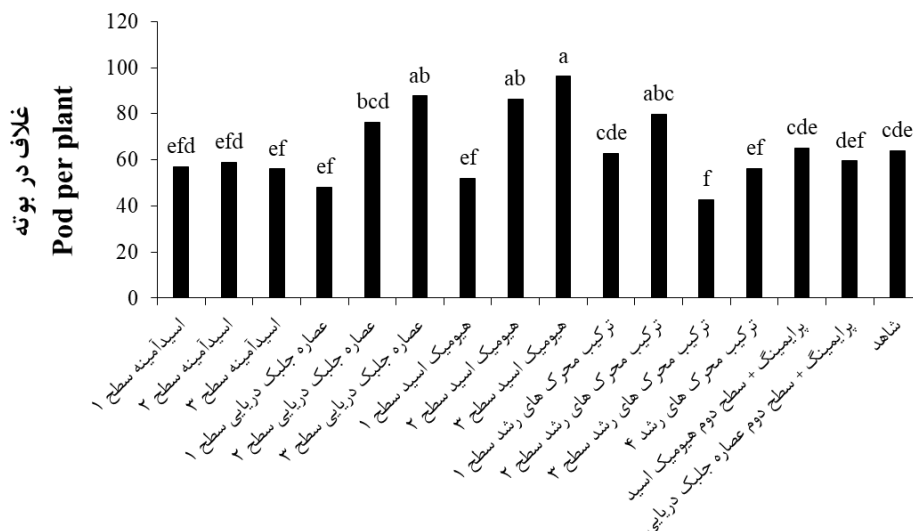
شکل ۲- تأثیر تیمارهای مختلف پوشش بذر بر عملکرد زیستی در گیاه کلزا. ستون‌های دارای حروف مشترک، بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد، تفاوت آماری معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

Fig. 2. Effect of different seed coating treatments on biological yield of canola plants. Columns with the same letter do not have statistically significant differences based on Least significant difference test at the 5% probability level.

با ۴۲/۸۴ عدد غلاف در بوته مربوط به تیمار سطح ۳ ترکیب محرک‌های رشد بود و کاهش ۱۵/۳۶ درصدی غلاف را نسبت به شاهد در بوته‌های کلزا داشت (شکل ۳). علاوه بر این در بین تیمارهای ترکیب محرک‌های رشد، تیمار سطح ۲ ترکیب محرک‌های رشد با ۷۹/۷۸ عدد غلاف در بوته عملکرد بهتری را نشان داد و افزایش ۲۴/۸۹ درصدی تعداد غلاف در بوته نسبت به تیمار شاهد را سبب شد. در بین تیمارهای پرایمینگ ترکیب تیماری پرایمینگ + سطح دوم اسید هیومیک با ۶۵/۲۲ عدد غلاف در بوته عملکرد بهتری نسبت به تیمار شاهد داشت حال آن که در ترکیب تیماری پرایمینگ + عصاره جلبک دریایی تعداد غلاف در بوته نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت.

تعداد غلاف در بوته

تعداد غلاف در بوته به عنوان یکی از اجزای کلیدی عملکرد، به طور معنی‌داری ($P < 0.01$) تحت تأثیر تیمارهای روکش‌دهی بذر قرار گرفت. تیمارهای پوشش دار کردن بذر با سطح ۳ اسید هیومیک، سطح ۳ عصاره جلبک دریایی و سطح ۲ اسید هیومیک به ترتیب با ۹۶/۲۲ غلاف در بوته، ۸۷/۷۷ غلاف در بوته و ۸۶/۳۸ غلاف در بوته اختلاف معنی‌داری با تیمار شاهد (۶۳/۸۸ غلاف در بوته) داشتند. این تیمارها به ترتیب موجب افزایش ۵۰/۶۲، ۳۷/۳۹ و ۳۵/۲۲ درصدی تعداد غلاف در بوته نسبت به تیمار شاهد شدند. کمترین تعداد غلاف در بوته



تیمارهای پوشش بذر

Seed coating treatments

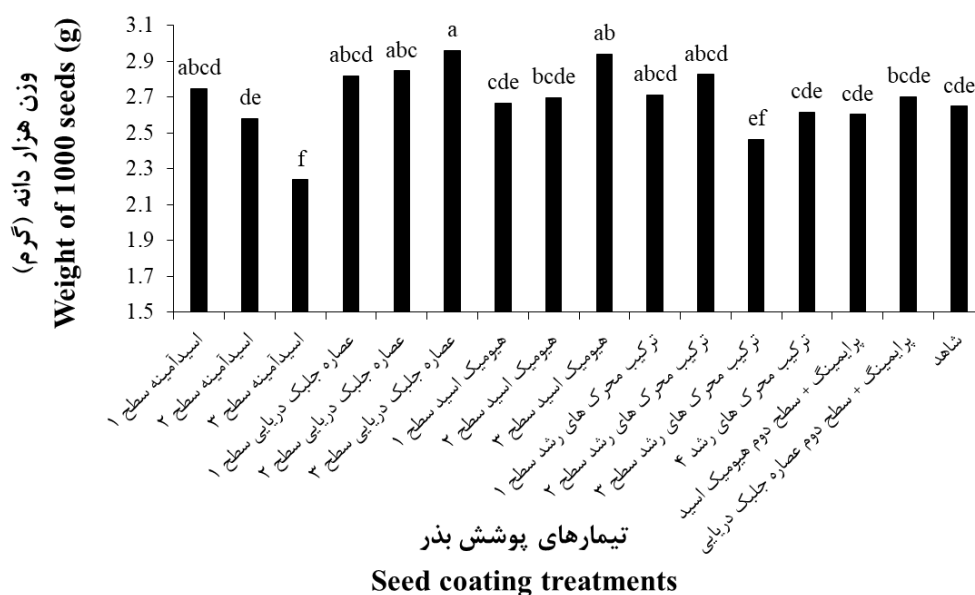
شکل ۳- تأثیر تیمارهای مختلف پوشش بذر بر تعداد غلاف در بوته در گیاه کلزا. ستون‌های دارای حروف مشترک، بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد، تفاوت آماری معنی‌داری با یکدیگر ندارند

Fig. 3. Effect of different seed coating treatments on the number of pods per plant in canola. Columns with the same letter do not have statistically significant differences based on Least significant difference test at the 5% probability level.

اسید آمینه اختصاص داشت که به کاهش ۱۶/۲۲ درصدی وزن هزاردانه نسبت به تیمار شاهد سبب شد (شکل ۴). در بین تیمارهای ترکیب محرک‌های رشد، تیمار سطح ۲ عملکرد بهتری را نشان داد و وزن هزار دانه را ۶/۴۱ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داد، حال آن که در بین تیمارهای پرایمینگ، تیمار پرایمینگ + سطح دوم اسید هیومیک با ۲/۶۰ گرم وزن هزار دانه را نسبت به تیمار شاهد کاهش داد که نشان دهنده تأثیر منفی ترکیب تیماری پرایمینگ همراه با پوشش بذر با سطح دوم اسید هیومیک بر وزن هزار دانه بود.

وزن هزار دانه

وزن هزار دانه به طور معنی‌داری ($P < 0.01$) تحت تأثیر تیمارهای روکش بذر قرار گرفت. تیمارهای پوشش دار کردن بذر با سطح ۳ اسید هیومیک و سطح ۳ عصاره جلبک دریایی به ترتیب با ۲/۹۶ گرم و ۲/۹۴ گرم اختلاف معنی‌داری با تیمار شاهد (۲/۶۵ گرم) داشتند و بین این دو از نظر آماری اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. این تیمارها به ترتیب موجب افزایش ۱۱/۶۹ درصدی و ۱۰/۹۴ درصدی وزن هزاردانه نسبت به تیمار شاهد شدند. کم‌ترین مقدار (۲/۳۴ گرم) به تیمار سطح ۳



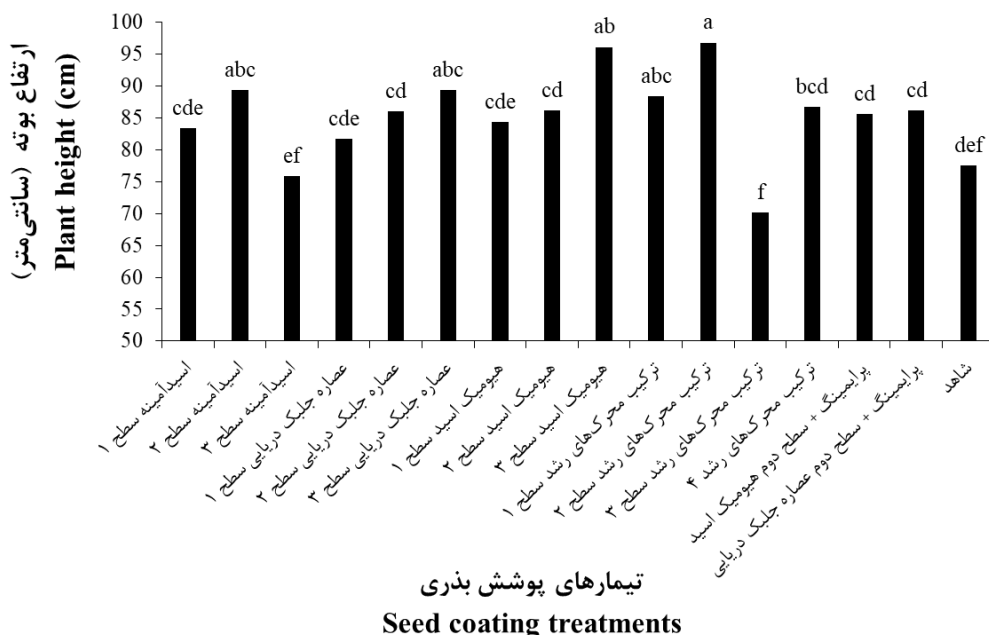
شکل ۴- تأثیر تیمارهای مختلف پوشش بذر بر وزن هزار دانه در گیاه کلزا. ستون‌های دارای حروف مشترک، بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد، تفاوت آماری معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

Fig. 4. Effect of different seed coating treatments on 1000-seed weight of canola plants. Columns with the same letter do not have statistically significant differences based on Least significant difference test at the 5% probability level.

گیاه است (شکل ۵). در تیمارهای پرایمینگ + اسید هیومیک و پرایمینگ + عصاره جلبک دریایی ارتفاع بوته نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت که نشان دهنده تأثیر مثبت این تیمارها بر صفت ارتفاع بوته است.

ارتفاع بوته

تیمارهای سطح ۲ ترکیب عوامل محرک رشد، سطح ۳ اسید هیومیک و سطح ۳ عصاره جلبک دریایی به ترتیب با ۹۶/۸۰، ۸۹/۴۰ و ۹۶/۱۰ سانتی‌متر، اختلاف معنی‌داری با تیمار شاهد (۷۷/۴۹ سانتی‌متر) داشتند و موجب افزایش ۲۴/۹۱ در صدی، ۲۴ در صدی و ۱۵/۳۶ در صدی ارتفاع بوته نسبت به تیمار شاهد شدند. در مقابل کمترین ارتفاع بوته در تیمار سطح ۳ ترکیب محرک‌های رشد (۷۰/۲۰ سانتی‌متر) ثبت شد که موجب کاهش ۹/۴۰ در صدی ارتفاع بوته نسبت به تیمار شاهد شد که نشان‌دهنده تأثیر منفی این ترکیب در غلظت بالا بر رشد رویشی



شکل ۵- تأثیر تیمارهای مختلف پوشش بذر بر ارتفاع بوته در گیاه کلزا. ستون‌های دارای حروف مشترک، بر اساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، تفاوت آماری معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

Fig. 5. Effect of different seed coating treatments on plant height of canola plants. Columns with the same letter do not have statistically significant differences based on Least significant difference test at the 5% probability level.

دریایی، سطح ۳ هیومیک اسید، سطح ۲ ترکیب محرک‌های رشد به دست آمد، در حالی که در تیمارهای سطح ۱ عصاره جلبک دریایی، سطح ۱ هیومیک اسید، پرایمینگ + سطح دوم عصاره جلبک دریایی و سطح ۳ ترکیب محرک‌های رشد کاهش عملکرد دانه، عملکرد زیستی و تعداد غلاف در بوته نسبت به تیمار شاهد مشاهده شد، بیانگر این نکته است که محرک‌های رشد گیاهی اگرچه به طور گسترده به دلیل توانایی‌شان در بهبود رشد و افزایش تحمل گیاهان به تنش‌های محیطی مورد توجه قرار گرفته‌اند، اما اثرات آن‌ها همواره مثبت و یکنواخت نیست (Du Jardin, 2015). در برخی از موارد ممکن است غلظت اشتباه ماده استفاده شده و یا شرایط زیست‌محیطی مثل موقعیت خاص مزرعه باعث عدم واکنش به این مواد باشد (Nardi et al, 2016). بنابراین یافته‌ها بیانگر این نکته هستند که نوع محرک و به خصوص غلظت آن، نقشی تعیین‌کننده در بهبود این صفات ایفا می‌کند. در نتیجه این یافته‌ها اهمیت روش پرایمینگ و پوشش‌دار کردن بذر را در بهینه‌سازی تولید کلزا برجسته می‌سازند.

تأثیر عصاره جلبک دریایی و وابستگی به غلظت

محققان بر این باورند که اثر تحریک‌کننده عصاره‌های جلبک دریایی بر رشد گیاه به دلیل مجموعه مواد فعالی است که با تأثیر بر تنظیم ژن در گیاه عمل می‌کنند (Arioli et al, 2015). از جمله این که در یک مطالعه سطوح

بحث

در عصر فناوری‌های مدرن و کشاورزی دقیق، این تقاضا وجود دارد که هر بذر باید سالم باشد و به راحتی جوانه بزند تا یک گیاهچه قوی تولید کند و باعث عملکرد بهتر محصول شود (Rakshit & Bahadur Singh, 2018). یکی از روش‌های بهبود عملکرد استفاده از روش‌های پیش‌تیمار بذر است (Mousavi Nik et al, 2015). پرایمینگ و پوشش‌دار کردن بذر از جمله روش‌های پیش‌تیمار بذر هستند که به عنوان یک ابزار بالقوه جهت بهبود جوانه‌زنی و عملکرد تحت شرایط و موقعیت‌های مختلف شناخته شده‌اند (Windauer et al, 2007; Rakshit & Bahadur Singh, 2018). اسید هیومیک و عصاره های جلبک دریایی از جمله محرک‌های رشد گیاهی با منشأ طبیعی هستند (Rouphael et al, 2020) که در جهت بهبود جوانه‌زنی و عملکرد همراه با روش‌های پیش‌تیمار بذر مورد استفاده قرار می‌گیرند و با افزایش متابولیسم گیاه و فتوسنتز رشد گیاه را تحریک نموده و بهره‌وری گیاه را افزایش می‌دهند (Yakhin et al, 2017). نتایج این پژوهش به وضوح نشان داد که کاربرد محرک‌های زیستی به طور معنی‌داری صفات عملکرد دانه، عملکرد زیستی، غلاف در بوته، ارتفاع بوته و وزن هزاردانه را بهبود بخشیدند اما در صفات شاخص برداشت، طول غلاف و تعداد دانه در غلاف بین تیمارهای آزمایشی تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. با توجه به این که بیش‌ترین مقدار برای صفات مورد بررسی به طور عمده در تیمارهای سطح ۳ عصاره جلبک

رشد گیاه را تنظیم می‌کند (Rathor et al, 2024). بنابراین، مصرف هیومیک اسید با جلوگیری از ریزش یا عقیم شدن غلاف‌ها در کلزا، تعداد دانه در غلاف را افزایش می‌دهد (Haqshenas et al, 2025) و با رشد رویشی قوی‌تر و تولید بیوماس بالاتر در تیمار سطح ۳ هیومیک اسید، ظرفیت تولید^{۱۴} گیاه را افزایش داده و با فراهم کردن جایگاه‌های بیشتر برای ذخیره مواد فتوسنتزی، منجر به افزایش تعداد غلاف در بوته شده است؛ صفتی که به عنوان یکی از اصلی‌ترین اجزای تعیین‌کننده عملکرد در کلزا شناخته می‌شود.

همبستگی صفات مورد بررسی

از جمله یافته‌های حائز اهمیت در این پژوهش، ثبت بالاترین وزن هزار دانه و ارتفاع بوته در تیمارهای سطح ۳ عصاره جلبک دریایی، سطح ۳ اسید هیومیک و سطح ۲ ترکیب محرک‌های رشد بود که بیش‌ترین عملکرد دانه را در بین تیمارهای آزمایشی داشتند در حالی که تیمارهای سطح ۳ اسید آمینه و سطح ۳ ترکیب محرک‌های رشد، کم‌ترین ارتفاع بوته، وزن هزار دانه و عملکرد دانه را در بین تیمارهای آزمایشی داشتند. با توجه به این نکته که در کلزا بعد از گلدهی، ساقه و غلاف به عنوان اندام اصلی فتوسنتز کننده و تأمین مواد فتوسنتزی و دانه به عنوان منبع ذخیره عمل می‌کنند (Edwards et al, 2011)، بنابراین این پدیده نمونه‌ای کلاسیک از روابط همبستگی بین اجزای عملکرد^{۱۵} است (Sadras and Slafer, 2012). زمانی که تعداد جایگاه‌های ذخیره (تعداد کل دانه‌ها) به شدت کاهش می‌یابد، رقابت بین آن‌ها برای دریافت مواد فتوسنتزی کم شده و با افزایش ارتفاع بوته و تعداد غلاف در بوته گیاه منابع بیشتری را به پر کردن دانه‌های باقی‌مانده اختصاص می‌دهد که منجر به افزایش وزن هر دانه می‌شود. این نتیجه نشان می‌دهد که این تیمارها می‌توانند با بهبود تأمین منابع در فرآیند پر شدن دانه‌های موجود، بر پتانسیل تولید تأثیر مثبتی داشته باشند. عدم وجود تفاوت معنی‌دار برای صفات شاخص برداشت و تعداد دانه در غلاف نیز حائز اهمیت است. این امر نشان می‌دهد که تیمارهای به کار رفته بیشتر بر رشد کلی و اندازه منبع^{۱۶} تأثیرگذار بوده‌اند تا بر کارایی انتقال مواد فتوسنتزی^{۱۷} یا تعداد تخمک‌های بارور شده در هر غلاف که این صفات ممکن است بیشتر تحت کنترل عوامل ژنتیکی باشند.

بیان ژن‌های نشانگر PinII و ETR-1 با استفاده از عصاره جلبک دریایی به طور قابل توجهی بالاتر از تیمارهای کنترل بود که در نتیجه با افزایش قابل توجه رونوشت‌های ژن‌های دخیل در بیوسنتز اکسین، جیبرلین و سیتوکینین همراه بود که شواهد احتمالی برای رشد القا شده در گیاهان تیمار شده با عصاره جلبک دریایی را ارائه می‌دهد (Ali et al, 2019). افزایش معنی‌دار عملکرد دانه در تیمار سطح ۳ عصاره جلبک دریایی را می‌توان به اثرات هم‌افزایی این ترکیبات نسبت داد. سیتوکینین‌ها و اکسین‌های موجود در عصاره، تقسیم سلولی و رشد ریشه را در مراحل اولیه استقرار گیاهچه به شدت تحریک می‌کنند (Battacharyya et al., 2015). این امر منجر به توسعه یک سیستم ریشه‌ای قوی‌تر، افزایش جذب آب و عناصر غذایی و در نهایت استقرار گیاهچه‌ای توانمند می‌شود که پتانسیل بالاتری برای تولید بیوماس و تخصیص آن به دانه‌ها دارد.

همچنین از جمله نکات قابل توجه در نتایج این تحقیق، واکنش متناقض عملکرد دانه به غلظت عصاره جلبک دریایی بود. در حالی که تیمار سطح ۳ آن عملکرد قابل توجهی را به همراه داشت، اما تیمار سطح ۱ آن منجر به ثبت عملکرد دانه کمتری از تیمار شاهد در این تحقیق شد؛ بنابراین این پدیده بیانگر این نکته است که موفقیت در کاربرد محرک‌های رشد نیازمند شناخت دقیق غلظت آستانه و تطابق آن با نیازهای فیزیولوژیکی گونه گیاهی مورد نظر است. این یافته بر اهمیت حیاتی بهینه‌سازی دوز مصرفی محرک‌های زیستی برای دستیابی به نتایج مطلوب تأکید می‌کند.

نقش اسید هیومیک در بهبود رشد و اجزای عملکرد

تیمار پوشش بذر با اسید هیومیک در بالاترین سطح (سطح ۳)، موفق‌ترین تیمار در افزایش عملکرد زیستی، تعداد غلاف در بوته و طول غلاف بود، که با یافته‌های مطالعات پیشین در کلزا (Barekati et al, 2019)، ذرت (Oktem and Oktem, 2020) و کاهو (Mohammed et al., 2022) مبنی بر افزایش عملکرد با کاربرد هیومیک اسید مطابقت داشت. به نظر می‌رسد اسید هیومیک به عنوان یک محرک زیستی برای چندین فرآیند زیستی در گیاهان مانند هدایت روزنه، سرعت تنفس، فتوسنتز، فعالیت‌های هورمونی و متابولیسم نیتروژن عمل می‌کند و بر رشد، تولید مثل و توسعه گیاه تأثیر می‌گذارد و از این رو کیفیت و کمیت محصول را بهبود می‌بخشد (Ichwan et al. 2016; García et al. 2022). همچنین به دلیل دارا بودن فعالیت‌هایی شبه اکسینی و سیتوکینینی، کیفیت و پارامترهای

¹⁶ Source size

¹⁷ Partitioning efficiency

¹⁴ Source capacity

¹⁵ Yield Component Compensation

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش اهمیت حیاتی نوع و غلظت بهیمنه محرک‌های زیستی به عنوان یک راه‌کار مؤثر در پوشش‌دار کردن بذر جهت بهبود عملکرد و اجزای عملکرد گیاه کلزا را برجسته کرد. پژوهش حاضر نشان داد که پوشش‌دار کردن بذر کلزا با محرک‌های زیستی، به ویژه پوشش بذر حاوی ۹ گرم عصاره جلبک دریایی در کیلوگرم بذر، به عنوان مؤثرترین تیمار، با ثبت بیشترین عملکرد دانه (۳/۲۱۸۵ کیلوگرم در هکتار) و افزایش معنی‌دار وزن هزار دانه، نقشی کلیدی در به حداکثر رساندن عملکرد دانه ایفا کرد. از سوی دیگر، تیمار پوشش بذر با ۹ گرم هیومیک اسید در کیلوگرم بذر، با دستیابی به بالاترین عملکرد زیستی (۳/۶۹۴۱ کیلوگرم در هکتار) و بیشترین تعداد غلاف در بوته (۲۲/۹۶ عدد)، نقشی کلیدی این تیمار در تقویت رشد رویشی را آشکار ساخت و تیمار پوشش بذر با ترکیب ۲ گرم اسید آمینه + ۶ گرم عصاره جلبک دریایی + ۳ گرم هیومیک اسید در کیلوگرم بذر به طور معنی‌داری ارتفاع بوته و عملکرد زیستی را بهبود بخشید. بنابراین کاربرد این محرک‌ها با تقویت استقرار بوته و بهبود رشد اولیه گیاهچه، موجب ارتقای توان فتوسنتزی و افزایش قابلیت جذب عناصر غذایی از خاک شده و با بهبود رابطه منبع و مخزن، به عنوان گامی مؤثر در جهت افزایش پایدار عملکرد کلزا توصیه می‌شود. با وجود نتایج مثبت و معنی‌دار به دست آمده در این پژوهش، باید توجه داشت که این آزمایش در طی یک سال زراعی انجام شده است. از آنجا که پایداری عملکرد تیمارهای بیولوژیک می‌تواند تحت تأثیر نوسانات اقلیمی سالیانه قرار گیرد، پیشنهاد می‌شود جهت تأیید نهایی این نتایج و اطمینان از ثبات کارایی این محرک‌ها در شرایط محیطی متغیر، این آزمایش در سال‌های زراعی بیشتر و در اقلیم‌های متفاوت تکرار گردد. از این رو، نتایج فعلی می‌تواند به عنوان یک مطالعه پایه‌ای ارزشمند برای توسعه پروتکل‌های پوشش بذر در کلزا در نظر گرفته شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از معاونت پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی به دلیل حمایت‌های مالی و معنوی و همچنین از کارشناسان و همکاران محترم در دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی که در اجرای این پژوهش ما را یاری نمودند، صمیمانه قدردانی نمایند.

بیانیه‌های اخلاقی و شفافیت

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافی در خصوص پژوهش و انتشار این مقاله وجود ندارد.

دسترسی به داده‌ها

مجموعه داده‌های تولید و تحلیل شده در این پژوهش، در صورت درخواست از نویسنده مسئول، در دسترس خواهد بود.


References

- Ahmadi, K., Ebadzadeh, H.R., Hatami, F., Abdshah, H., and Kazemian, A. 2019. Agricultural statistics for the 2017-2018 growing season. Vol 1. Ministry of Jihad Agriculture, Tehran, Iran. (in Persian)
- Ahmadi, K., Hosseinpour, R., Ebadzadeh, H.R., Gholizadeh, H.A., Hatami, F., Mohammadnia-Afrouzi, S., Abdshah, H., and Abbas-Taghani, R. 2015. Review of 36-year statistics of cultivated area and production of agricultural products (1978-2013). Ministry of Jihad Agriculture, Tehran, Iran. (in Persian)
- Ali, O., Ramsubhag, A., and Jayaraman, J. 2019. Biostimulatory activities of *Ascophyllum nodosum* extract in tomato and sweet pepper crops in a tropical environment. *Plos One* 14: e216710. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0216710>
- Arioli, T., Mattner, S.W., and Winberg, P.C. 2015. Applications of seaweed extracts in Australian agriculture: past, present and future. *Journal of Applied Phycology* 27: 2007-2015. <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0574-9>
- Azarmehr, A.R., Baghi, M., and Ziyaei Nasab, M. 2017. Effect of seaweed extract and sulfur-sulfated fertilizer on yield and some yield components of autumn canola (*Brassica napus* L.) cv. Natalie. *Journal of Crop Research in Semi-arid Regions* 14(3): 155-165. (in Persian)
- Barekati, F., Majidi Hervan, E., Shirani Rad, A.H., and Noor Mohamadi, G. 2019. Effect of sowing date and humic acid foliar application on yield and yield components of canola cultivars. *Tarim Bilimleri Dergisi* 25(1): 70-78. <https://doi.org/10.15832/ankutbd.447738>
- Battacharyya, D., Babgohari, M.Z., Rathor, P., and Prithiviraj, B. 2015. Seaweed extracts as biostimulants in horticulture. *Scientia Horticulturae* 196: 39-48. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.012>
- Cerdán, M., Sánchez-Sánchez, A., Oliver, M., Juárez, M., and Sánchez-Andreu, J.J. 2009. Effect of foliar and root application of amino acids on iron uptake by plants. *Acta Horticulturae* 830: 481-488. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2009.830.69>
- Copland, L.O., and McDonald, M.B. 2008. Principles of seed science and technology. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- aDu Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: definition, concept, main categories and regulation. *Sci.Hortic.*, 196. <https://doi.org/doi:10.1016/j.scienta.2015.09.021>.
- Edwards, J.T., Cowra, H., and Cowra, K. 2011. Canola growth and development. NSW Department of Primary Industries, Orange, Australia.
- FAO. 2017. Food outlook: Biannual report on global food markets. FAO Trade and Markets Division, Rome, Italy.
- Faten, S.A., Shaheen, A.M., Ahmed, A.A., and Mahmoud, A.R. 2010. Effect of foliar application of amino acids as antioxidants on growth, yield and characteristics of squash. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences* 6(5): 583-588.
- García, A.C., De Souza, L.G., Pereira, M.G., Castro, R.N., Maria, J., Zonta, E., Lisboa, F.J., and Berbara, R.L. 2016. Structure-property-function relationship in humic substances to explain the biological activity in plants. *Scientific Reports* 6: 20798. <https://doi.org/10.1038/srep20798>
- Gardner, F.P., Brent Pearce, R., and Mitchell, R.B. 1985. *Physiology of Crop Plants*. Iowa State University Press, Ames, Iowa, USA.
- Ghanbari, A.A., Shakiba, M.R., Toorchi, M., and Choukan, R. 2013. Morphophysiological response of common bean leaf to water deficit stress. *European Journal of Experimental Biology* 3(1): 487-492.
- Haqshenas, A., Azizi, K., Bakhtiari, N., and Heydari, S. 2025. Evaluation of photosynthetic pigments, yield and yield components of mung bean (*Vigna radiata* L.) in response to humic acid application and irrigation interruption. *Crop Science Research in Arid Regions* 7(1): 217-233. (in Persian)
- Heydecker, W., and Coolbaer, P. 1977. Seed treatments for improved performance - survey and attempted prognosis. *Seed Science and Technology* 5: 353-425.
- Ichwan, B., Eliyanti, E., Irianto, I., and Zulkarnain, Z. 2022. Combining humic acid with NPK fertilizer improved growth and yield of chili pepper in dry season. *Advances in Horticultural Science* 36(4): 275-281. <https://doi.org/10.36253/ahsc-12816>
- Meena, M.K., Dhanoji, M.M., and Naik, M.C. 2023. Influence of humic acid foliar spray on physiological growth indices in redgram (*Cajanus Cajan*). *Agriculture*

- Association of Textile Chemical and Critical Reviews Journal 11(2): 378-384.
21. Mohammed, A.A., Söylemez, S., and Sarhan, T.Z. 2022. Effect of biofertilizers, seaweed extract and inorganic fertilizer on growth and yield of lettuce (*Lactuca sativa* var. *longifolia* L.). *Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi* 26(1): 60-71. <https://doi.org/10.29050/harranziraat.1016268>
 22. Mousavi Nik, S.M., Dahmarde, M., and Sirousmehr, A. 2015. Seed Physiology and Aspects of Application in Agriculture. JDM Press, Mashhad, Iran. 368 p. (in Persian)
 23. Nardi, S., D. Pizzeghello, M. Schiavon, and A. Ertani. 2016. Plant biostimulants: physiological responses induced by protein hydrolyzed-based products and humic substances in plant metabolism. *Scientia Agricola* 73: 8-23.
 24. Oktem, A.G., and Oktem, A. 2020. Effect of Humic Acid Application Methods on Yield and Some Yield Characteristics of Corn Plant (*Zea mays* L.). *Journal of Applied Life Sciences International* 23(11): 31-37. <https://doi.org/10.9734/jalsi/2020/v23i1130195>
 25. Olsen, S.R. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. Circular No. 939, US Department of Agriculture, Washington D.C., USA.
 26. Popko, M., Michalak, I., Wilk, R., Gramza, M., Chojnacka, K., and Górecki, H. 2018. Effect of the new plant growth biostimulants based on amino acids on yield and grain quality of winter wheat. *Molecules* 23(4): 872. <https://doi.org/10.3390/molecules23040872>
 27. Rahimi, Z., Mozaffari, H., and Hassanpour Darvishi, H. 2016. Investigation the effect of humic acid in irrigation water on yield and yield components of rapeseed. *Journal of Agronomy and Plant Breeding* 12(1): 95-106. (in Persian)
 28. Rakshit, A., & Bahadur Singh, H. (2018). *Advances in Seed Priming*. Springer Nature Singapore Pte Ltd. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-13-0032-5>.
 29. Rathor, P., Upadhyay, P., Ullah, A., Gorim, L.Y., and Thilakarathna, M.S. 2024. Humic acid improves wheat growth by modulating auxin and cytokinin biosynthesis pathways. *AoB Plants* 16: plae018. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plae018>
 30. Rathore, S.S., Chaudhary, D.R., Boricha, G.N., Ghosh, A., Bhatt, B.P., Zodape, S.T., and Patolia, J.S. 2009. Effect of seaweed extract on the growth, yield and nutrient uptake of soybean (*Glycine max*) under rainfed conditions. *South African Journal of Botany* 75(2): 351-355. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2008.10.009>
 31. Rocha, I., Duarte, I., Ma, Y., Souza-Alonso, P., Látr, A., Vosátka, M., Freitas, H., and Oliveira, R.S. 2019. Seed Coating with Arbuscular Mycorrhizal Fungi for Improved Field Production of Chickpea. *Agronomy* 9(8): 471. <https://doi.org/10.3390/agronomy9080471>
 32. Rouphael, Y., and Colla, G. 2020. Biostimulants in agriculture. *Frontiers in Plant Science* 11: 40. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00040>
 33. Sadras, V.O., and Slafer, G.A. 2012. Environmental modulation of yield components in cereals: heritabilities and causal relationships. *Field Crops Research* 128: 60-68. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.12.006>
 34. Shen, J., Liu, Y., Wang, X., Bai, J., Lin, L., Luo, F., and Zhong, H. 2023. A Comprehensive Review of Health-Benefiting Components in Rapeseed Oil. *Nutrients* 15(4): 999. <https://doi.org/10.3390/nu15040999>
 35. Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., and Loeppert, R.H. 2020. *Methods of Soil Analysis, Part 3: Chemical Methods*. Soil Science Society of America (SSSA) and American Society of Agronomy (ASA), Madison, WI, USA. 1390 p.
 36. Windauer, L.B., Altuna, A., and Benech-Arnold, R.L. 2007. Hydrotime analysis of *Lesquerella fendleri* seed germination responses to priming treatments. *Industrial Crops and Products* 25(1): 70-74. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2006.07.004>
 37. Yakhin, O.I., Lubyaynov, A.A., Yakhin, I.A., and Brown, P.H. 2017. Biostimulants in plant science: A global perspective. *Frontiers in Plant Science* 7: 2049. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02049>



Multicriteria Analysis of the Effects of Organic Growth Stimulants on Reducing Damage Caused by Drought Stress in Sugar Beet

Reza Mohammadiki^a , Mohammad Pasandideh^a, Farahnaz Hamdi Holasoo^b, and Vali-Allah Yousef Abadi^b

^a Soil and Water Research Institute (SWRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

^b Sugar Beet Seed Institute (SBSI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

Article Info

Article Type

Research Article

Received

December 24, 2025

Revised

April 27, 2026

Accepted

May 16, 2026

Published online

June 17, 2026

Keywords

Amino acids,
Humic acid,
Sensitivity analysis,
Stability,
Monte Carlo method.

*Corresponding author's email

rmswri@gmail.com

Extended Abstract

Background and Objectives: Sugar beet (*Beta vulgaris* L.) is one of the most important sugar-producing crops in arid and semi-arid regions, where water scarcity is a major limiting factor for yield and quality. Drought stress often reduces root growth and sugar yield, necessitating the development of sustainable management strategies to enhance drought tolerance. In recent years, organic growth stimulants such as amino acids and humic substances have attracted increasing attention due to their environmentally friendly nature and potential to improve plant performance under abiotic stresses. These stimulants not only promote physiological and biochemical processes in plants but also enhance soil health and nutrient availability, contributing to overall crop resilience. The objective of this pilot study was to preliminarily assess the effectiveness of different organic growth stimulants in alleviating drought stress effects on sugar beet and to identify superior treatments using an integrated multi-criteria decision-making approach. The findings of this research are expected to provide valuable insights for developing practical, eco-friendly strategies to improve sugar beet productivity under water-limited conditions.

Materials and Methods: This study was conducted at the Kamalshahr Research Station, Karaj, Iran, using a split-plot arrangement within a randomized complete block design. Two irrigation regimes, including normal irrigation and drought stress, were assigned to main plots, while four nutritional treatments (control, amino acid, humic acid, and combined application of growth stimulants) were allocated to subplots. Several quantitative and qualitative traits related to root yield and sugar quality were measured during the growing season. In addition to conventional analysis of variance, the Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) was employed to rank treatments by simultaneously considering multiple criteria with equal weights. To evaluate the robustness and stability of the rankings, Monte Carlo simulation was applied based on repeated random perturbations of the input data.

Results: The results showed that drought stress markedly reduced root yield and root weight, while increasing root dry matter content (dry root pulp weight / fresh root pulp weight) and pure sugar percentage. Growth stimulant treatments generally improved root yield under both irrigation regimes, with humic acid and the combined application showing more pronounced positive effects. Multi-criteria analysis indicated that under normal irrigation conditions, the amino acid treatment achieved the highest closeness to the ideal solution. In contrast, under drought stress conditions, the combined application of growth stimulants was clearly identified as the superior treatment and ranked first in more than 95 % of Monte Carlo simulation runs, demonstrating a high level of ranking stability.

Conclusion: Although the outcomes of this research are preliminary and derived from a pilot study, the results suggest that organic growth stimulants, particularly the combined application, have considerable potential for mitigating drought stress effects in sugar beet. Moreover, the integration of TOPSIS with Monte Carlo simulation proved to be a powerful and reliable framework for multi-criteria evaluation and early-stage screening of management options. These findings provide a scientific basis for designing more comprehensive field experiments and developing sustainable irrigation and nutritional strategies for sugar beet production under water-limited conditions.

Cite this article: Mohammadikia, R., Pasandideh, M., Hamdi Holasoo, F., Yousef Abadi, V., 2026. Multicriteria Analysis of the Effects of Organic Growth Stimulants on Reducing Damage Caused by Drought Stress in Sugar Beet. Research Article, *Journal of Soil Research*, 40 (1), pp 61-79.



DOI: <https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.370715.807>

Publisher: Soil Science Society of Iran



نشریه پژوهش‌های خاک

(علوم خاک و آب)

<https://srjournal.arsoc.ir/>



تحلیل چندمعیاره اثر محرک‌های آلی رشد بر کاهش خسارت ناشی از تنش خشکی در چغندرقد

رضا محمدی کیا^{۱*}، محمد پسندیده^۱، فرحناز حمدی هولاسو^۲ و ولی اله یوسف آبادی^۲

^۱ مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

^۲ مؤسسه تحقیقات چغندرقد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

به‌منظور بررسی اولیه توان محرک‌های آلی رشد در کاهش آثار تنش خشکی در چغندرقد (*Beta vulgaris* L.)، پژوهشی به‌صورت پیش‌آزمون در ایستگاه تحقیقاتی کمال‌شهر کرج انجام شد. آزمایش به صورت اسپلیت پلات (کرت‌های خردشده) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی اجرا شد. عامل اصلی آبیاری در دو سطح (آبیاری نرمال و تنش خشکی) و عامل فرعی تغذیه در چهار سطح (شاهد، اسید آمینه، اسید هیومیک و تیمار تلفیقی) قرار داشت. هر تیمار در هر بلوک با سه تکرار اجرا شد. صفات کمی و کیفی در طول رشد اندازه‌گیری و با تحلیل واریانس و روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس همراه با شبیه‌سازی مونت‌کارلو ارزیابی شد تا بتوان مقایسه دقیقی میان تیمارها با در نظر گرفتن چند شاخص عملکردی و کیفی انجام داد. نتایج نشان داد که تنش خشکی، عملکرد و وزن ریشه را کاهش و درصد ماده خشک خمیر ریشه (نسبت وزن خشک خمیر ریشه به وزن تر خمیر ریشه) و قند خالص را افزایش داد. تیمارهای محرک رشد، به‌ویژه اسید هیومیک و تیمار مصرف تلفیقی، عملکرد ریشه را بهبود دادند که نشان‌دهنده توان بالقوه این تیمارها در کاهش آثار منفی کم‌آبی بودند. تحلیل چندمعیاره حاکی از آن بود که در آبیاری نرمال، اسید آمینه و در تنش خشکی، مصرف تلفیقی تیمارها بهترین گزینه بود و در بیش از ۹۵ درصد شبیه‌سازی‌ها رتبه اول را کسب کرد. این نتایج مقدماتی، ظرفیت بالای رویکرد تلفیقی تاپسیس و مونت‌کارلو را به‌عنوان ابزاری کارآمد برای غربالگری تیمارهای مدیریتی و طراحی آزمایش‌های گسترده‌تر در شرایط خشکی نشان داد.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۲۷

واژه‌های کلیدی

اسید آمینه،

اسید هیومیک،

پایداری،

تحلیل حساسیت،

روش مونت کارلو.

* ایمیل نویسنده مسئول

rmswri@gmail.com

استاد: محمدی کیا، ر.، پسندیده، م.، حمدی هولاسو، ف.، یوسف آبادی، و.، ۱۴۰۵. تحلیل چندمعیاره اثر محرک‌های آلی رشد بر کاهش خسارت ناشی از

تنش خشکی در چغندرقد. مقاله پژوهشی، نشریه پژوهش‌های خاک، (۱) ۴۰، ص ۶۱-۷۹.

DOI: <https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.370715.807>



مقدمه

چغندرقد (*Beta vulgaris L.*) گیاهی دولپه‌ای از خانواده *Chenopodiaceae* است و یکی از منابع اصلی تولید شکر در جهان و ایران محسوب می‌شود. در ایران، این محصول از اهمیت اقتصادی بالایی برخوردار است و سطح زیر کشت آن در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۴۰۱ حدود ۱۰۸ هزار هکتار گزارش شده است (FAO, 2021). چغندرقد یک گیاه دوساله است که در سال اول چرخه رشد خود، بخش اعظم انرژی فتوسنتزی را در برگ‌ها تولید کرده و آن را به صورت ساکارز در ریشه ذخیره می‌کند و در شرایط طبیعی پس از مواجهه با سرما در زمستان وارد مرحله زایشی می‌شود و ساقه گل‌دهنده و بذر تولید می‌کند؛ با این حال در زراعت شکر معمولاً این گیاه را فقط برای برداشت ریشه در سال اول کشت و برداشت می‌کنند (Sparkes, 2017). دوره رشد این گیاه بین ۱۷۰ تا ۲۰۰ روز طول می‌کشد و شامل مراحل جوانه‌زنی و استقرار بوته، رشد رویشی، تشکیل عملکرد و رسیدگی محصول است (Levitt, 1980).

در شرایط آبیاری نرمال، عملکرد واقعی گیاه می‌تواند به پتانسیل ژنتیکی نزدیک شود. با این حال، بهره‌برداری کامل از ظرفیت رشد نیازمند مدیریت مناسب تغذیه و استفاده از محرک‌های رشد مؤثر است. محرک‌های رشد آلی-زیستی شامل اسیدهای آمینه، هیومیک و اسیدهای فولویک هستند که با بهبود فرآیندهای فیزیولوژیکی و متابولیسم گیاه، رشد، عملکرد و کیفیت محصول را ارتقا می‌دهند (Chen, 2022; Keskin et al., 2025). اسیدهای آمینه نیز به‌عنوان محرک‌های طبیعی رشد، نقش مهمی در بهبود کیفیت و عملکرد چغندرقد دارند و با تأثیر بر سنتز پروتئین، فعال‌سازی مسیرهای متابولیسمی و تقویت سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی، کارایی فتوسنتز و رشد رویشی گیاه را افزایش می‌دهند (Khan et al., 2012; Anjum et al., 2014). اسیدهای هیومیک با افزایش توسعه سیستم ریشه‌ای، جذب آب و عناصر غذایی را تسهیل کرده و تولید کلروفیل و میزان فتوسنتز برگ‌ها را بهبود می‌دهند (Ampong et al., 2022). این ترکیب با تحریک فعالیت آنزیم‌های مرتبط با سنتز پروتئین و رشد سلولی باعث افزایش وزن تر و خشک ریشه و درصد قند می‌شود (Naderi et al., 2002). استفاده منظم از اسید هیومیک در شرایط آبیاری نرمال، عملکرد کمی و کیفی محصول را افزایش داده، ضایعات را کاهش و ضریب برداشت شکر را بهبود می‌بخشد (Rose et al., 2014).

اسیدهای فولویک نیز با بهبود جذب عناصر غذایی و افزایش فعالیت آنزیمی، نقش مهمی در ارتقای کیفیت و عملکرد محصول دارند (Rose et al., 2014). مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از محرک‌های آلی-زیستی، علاوه بر افزایش عملکرد و

کیفیت ریشه، باعث بهبود ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه، مانند افزایش سطح برگ، کلروفیل و فعالیت فتوسنتزی می‌شود (Ampong et al., 2022; Naderi et al., 2002) و می‌تواند هزینه‌های کود شیمیایی را کاهش دهد (Chen, 2022).

اسید هیومیک و فولویک هر دو محرک‌های رشد طبیعی هستند که از تجزیه مواد آلی خاک حاصل می‌شوند، اما ویژگی‌های متفاوتی دارند. اسید هیومیک با وزن مولکولی بالاتر، عمدتاً بر ساختار خاک، ظرفیت نگهداری آب و تثبیت عناصر غذایی اثر می‌گذارد، در حالی که اسید فولویک با وزن مولکولی پایین‌تر، سریع‌تر جذب گیاه شده و رشد و متابولیسم آن را تحریک می‌کند. در کودهای تجاری حاوی هیومیک، معمولاً مقداری فولویک نیز وجود دارد تا اثرات سینرژیک کوتاه‌مدت و بلندمدت بر رشد ریشه، عملکرد و کیفیت محصول ایجاد شود (Chen, 2022; Keskin et al., 2025; Rose et al., 2014).

علاوه بر افزایش عملکرد کمی، کیفیت محصول چغندرقد، به‌ویژه درصد قند و ویژگی‌های مرتبط با استحصال شکر، نقش تعیین‌کننده‌ای در سودآوری نهایی دارد. در بسیاری از موارد، تیمارهایی که موجب افزایش عملکرد ریشه می‌شوند، لزوماً منجر به بهبود کیفیت تکنولوژیک محصول نمی‌گردند و حتی ممکن است برخی شاخص‌های کیفی را کاهش دهند. از این رو، ارزیابی همزمان صفات کمی و کیفی برای انتخاب تیمار بهینه در مدیریت تغذیه و آبیاری چغندرقد ضروری است. محرک‌های رشد آلی-زیستی، به دلیل اثرگذاری هم‌زمان بر فرآیندهای رشدی، فیزیولوژیکی و متابولیسمی، می‌توانند بر این تعادل اثرگذار باشند و نیازمند بررسی جامع‌تری هستند (Rose et al., 2014; Chen, 2022).

تنش خشکی یکی از مهم‌ترین محدودکننده‌های تولید محصولات کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، از جمله ایران، به شمار می‌رود. کمبود آب موجب کاهش رشد رویشی، اختلال در فتوسنتز، افزایش تنفس، کاهش توسعه ریشه و کاهش عملکرد می‌شود. در چنین شرایطی، استفاده از راهکارهای مدیریتی مؤثر برای افزایش کارایی مصرف آب و کاهش اثرات منفی خشکی ضروری است.

اسیدهای هیومیک و فولویک با بهبود ساختمان خاک، افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت و تحریک فعالیت میکروارگانیسم‌های مفید، شرایط بهتری برای رشد ریشه فراهم می‌کنند و ظرفیت فتوسنتزی گیاه را در شرایط تنش حفظ می‌کنند (Naderi et al., 2002; Khan et al., 2012). اسیدهای آمینه نیز با نقش مستقیم در تنظیم پاسخ گیاه به تنش خشکی، عملکرد فتوسنتز و وضعیت آب گیاه را حفظ می‌کنند (Anjum et al., 2014).

شاهد، اسید آمینه، اسید هیومیک و مصرف تلفیقی به‌عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شدند. عامل اصلی شامل دو سطح زمان آبیاری، آبیاری پس از ۷۰ تا ۸۰ میلی‌متر تبخیر تجمعی از تشت تبخیر کلاس (A) (آبیاری بدون تنش) و آبیاری پس از ۱۳۰ تا ۱۴۰ میلی‌متر تبخیر تجمعی از تشت تبخیر کلاس (A) (آبیاری با تنش) بود که در کرت‌های اصلی اعمال شد (Taha et al., 2011; Lakhawat et al., 2024).

عامل فرعی چهار تیمار تغذیه‌ای شامل شاهد، محلول‌پاشی اسید آمینه، کود آبیاری هیومیک اسید و ترکیب محلول‌پاشی اسید آمینه و کود آبیاری هیومیک اسید (تیمار مصرف تلفیقی) بود که به‌صورت تصادفی در زیرکرت‌های هر کرت اصلی با مساحت ۴۰ مترمربع قرار گرفت. در همه تیمارها، کودهای شیمیایی مطابق آزمون خاک مصرف شد. انتخاب این طرح به دلیل ماهیت عوامل آزمایشی و محدودیت‌های اجرایی صورت گرفت و امکان بررسی اثرات اصلی و متقابل عوامل را فراهم نمود.

ویژگی‌های خاک

انتخاب زمین مناسب بر اساس ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک انجام شد تا شرایط یکنواخت و قابل مقایسه برای اجرای آزمایش فراهم شود. برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، نمونه‌های مرکب خاک از اعماق ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متر برداشت شده، در هوا خشک و از ال‌ک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. اسیدیته (pH) و هدایت الکتریکی (EC) در عصاره اشباع خاک اندازه‌گیری شدند (Rhoades, 1982). کربن آلی (OC) با استفاده از روش Walkley-Black تعیین گردید (Nelson & Sommers, 1996). فسفر قابل‌استخراج (P) با روش Olsen و پتاسیم قابل جذب (K) با روش استخراج آمونیوم استات اندازه‌گیری شدند (Olsen & Sommers, 1982; Sparks et al., 1996). عناصر کم‌مصرف شامل آهن (Fe)، روی (Zn)، منگنز (Mn) و مس (Cu) با جذب اتمی تعیین شدند (Lindsay & Norvell, 1978). کربنات کلسیم معادل (TNV) طبق روش Loepfert & Suarez (۱۹۹۶) اندازه‌گیری شد. نیتروژن کل (Total N) بر اساس روش Kjeldahl تعیین شد (Bremner, 1960). بافت خاک با روش هیدرومتریک مشخص گردید (Gee & Bauder, 1986). رطوبت نقطه ظرفیت زراعی (FC) و نقطه پژمردگی دائم (PWP) با استفاده از روش فشارسنجی خاک (Pressure Plate) و جرم مخصوص ظاهری خاک (Bulk Density) با روش محاسباتی (نسبت وزن خشک خاک به حجم کل نمونه خاک) تعیین شد. این پارامترها برای

تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب مناسب‌ترین تیمار تغذیه‌ای در شرایط تنش خشکی، به دلیل تضاد بالقوه میان شاخص‌های مختلف عملکرد، کیفیت و وضعیت فیزیولوژیکی گیاه، فرآیندی پیچیده و چندبعدی است. اتکای صرف بر یک یا چند شاخص محدود، نمی‌تواند بازتاب‌دهنده عملکرد واقعی تیمارها در شرایط مزرعه باشد. در این زمینه، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره با امکان وزن‌دهی همزمان به شاخص‌های مختلف و مقایسه گزینه‌ها بر اساس نزدیکی به شرایط ایده‌آل، ابزار کارآمدی برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری علمی در مدیریت زراعی محسوب می‌شوند (Hwang & Yoon, 1981; Behzadian et al., 2012). با توجه به اهمیت اقتصادی چغندر قند و نقش بالقوه محرک‌های رشد در ارتقای صفات کمی و کیفی، مطالعه حاضر به‌منظور بررسی اثر محلول‌پاشی اسیدهای آمینه و کود آبیاری اسید هیومیک بر عملکرد و کیفیت چغندر قند تحت شرایط مختلف آبیاری با استفاده از تصمیم‌گیری چندمعیاره به روش تاپسیس^۱ (TOPSIS) انجام شده است. نتایج این تحقیق می‌تواند راهنمای علمی و عملی برای افزایش عملکرد و کیفیت چغندر قند باشد و کاربرد روش‌های تحلیل چندمعیاره در مدیریت تیمارهای کشاورزی را نشان دهد.

مواد و روش‌ها

محل پژوهش و طرح آماری

این پژوهش در سال زراعی ۱۴۰۲ در ایستگاه تحقیقاتی کمال‌شهر، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندر قند، استان البرز اجرا شد. ایستگاه تحقیقاتی در مختصات جغرافیایی ۲۷° ۳۹' شمالی و ۴۵° ۴۷' شرقی واقع شده است. منطقه مورد مطالعه دارای آب‌وهوای نیمه‌خشک با تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های سرد است.

مطالعه حاضر به‌عنوان یک پیش‌آزمون (Pre-test) طراحی شد. هدف آن، ارزیابی عملی بودن طرح، شناسایی چالش‌های اجرایی و گردآوری داده‌های مقدماتی برای اصلاح و بهبود طراحی آزمایش‌های آینده با تکرار بیشتر بود؛ بنابراین، هر چند مدت اجرای طرح یک‌ساله و تکرار محدود (سه تکرار) بود، یافته‌ها به‌عنوان داده‌های اولیه و قابل تفسیر به صورت توصیه‌ای و غیرقطعی ارائه می‌شوند.

داده‌های حاصل از آزمایش در قالب طرح کرت‌های خرد شده (Split-plot) با سه تکرار و بلوک‌های کامل تصادفی جمع‌آوری شدند. در این طرح، سطوح آبیاری (آبیاری نرمال و تنش خشکی) به‌عنوان عامل اصلی و تیمارهای محرک رشد شامل

¹ Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

این مجموعه از اندازه‌گیری‌ها، مشخصات جامع خاک برای اجرای آزمایش و تحلیل اثرات تیمارها را فراهم نمود. برخی خصوصیات اندازه‌گیری شده خاک در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

محاسبه عمق آب قابل استفاده و مدیریت آبیاری مورد استفاده قرار گرفت، به گونه‌ای که حجم آب قابل استفاده در خاک (Available Water Capacity) از تفاضل FC و PWP ضرب در عمق مؤثر ریشه و جرم مخصوص ظاهری خاک به دست آمد.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک قطعات مورد آزمایش
Table 1. Some Physical Properties of Soil in the Tested Plots

| بافت خاک Soil Texture | جرم مخصوص ظاهری Bulk Density (g/cm ³) | رطوبت نقطه پژمردگی دائم (PWP) (% w/w) | رطوبت نقطه زراعی (FC) (% w/w) | اسیدیته pH | هدایت الکتریکی EC (dS m ⁻¹) |
|--------------------------|---|--|-------------------------------------|---------------|--|
| CL | 1.55 | 10.2 | 21.5 | 8.3 | 0.61 |

جدول ۲- برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک قطعات مورد آزمایش
Table 2. Some Chemical Properties of Soil in the Tested Plots

| کربنات کلسیم معادل TNV (%) | کربن آلی OC (%) | نیتروژن کل N (%) | فسفر P | پتاسیم K | آهن Fe | روی Zn | منگنز Mn | مس Cu |
|-------------------------------------|-----------------------|------------------------|-----------|-------------|-----------|-----------|-------------|----------|
| 11.7 | 1.1 | 0.22 | 11.2 | 285 | 4.2 | 4.3 | 7.6 | 1.1 |

زمانی کسر رطوبت خاک، مقدار تبخیر تجمعی از تشت تبخیر کلاس A بود که در واقع تعیین کننده زمان آبیاری بود. معیار کسر رطوبت برای تعیین عمق آب آبیاری، محاسبه کسری رطوبت خاک در زمان آبیاری نسبت به رطوبت نقطه زراعی بود. مدیریت علف‌های هرز، آفات و بیماری‌ها مطابق اصول منطقه انجام شد. برداشت زمانی انجام شد که درصد قند به حداکثر رسید و برگ‌ها سبز متمایل به زرد شدند.

اندازه‌گیری صفات کمی و کیفی چغندر قند

تمام صفات کمی و کیفی مورد بررسی در این مطالعه بر اساس روش‌های استاندارد تعیین شدند. عملکرد ریشه و وزن غده با جمع‌آوری ریشه‌ها از دو ردیف کشت در هر کرت و محاسبه میانگین آنها به دست آمد (AOAC, 2000). برای ارزیابی کیفی ریشه‌های چغندر قند، از هر کرت به صورت تصادفی تعداد پنج ریشه چغندر قند به صورت تک نمونه انتخاب و نمونه‌برداری شد تا تنوع ظاهری ریشه‌ها در کرت به‌طور مناسب نمایان شود. درصد قند و قند قابل استحصال با استفاده از روش کلرواستیک-پلین اندازه‌گیری شد (ICUMSA, 2011)، در حالی که ملاس با استخراج حرارتی و سنجش قند غیرقابل استحصال تعیین گردید (ICUMSA, 2011). نیتروژن مضره ریشه‌ها از طریق روش کجل‌دال (Kjeldahl) تعیین شد (Bremner, 1960) و پتاسیم و سدیم محلول با آنالیز جذب اتمی اندازه‌گیری گردید (FAO, 2013). کلیات ریشه با اندازه‌گیری pH محلول و محاسبه بر اساس استانداردهای AOAC تعیین شد (AOAC, 2000).

عملیات زراعی

چغندر قند رقم غالب منطقه با توصیه کارشناسان مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندر قند در کرت‌هایی به طول ۱۰ متر و عرض ۴ متر کشت شد، تراکم ۸۰ هزار بوته در هکتار رعایت شد. بر اساس نتایج آزمون خاک، کود شیمیایی اوره به شکل تقسیط در سه مرحله پس از آبیاری اول (۵۰ کیلوگرم در هکتار)، ۴ تا ۶ برگی (۳۰ تا ۴۰ درصد مقدار کل اوره برآوردی) و مابقی در مرحله رشدی ۸ تا ۱۰ برگی مصرف شد. به منظور جلوگیری از افزایش عیار چغندر قند، از مصرف کود اوره یک هفته قبل از برداشت خودداری شد. همچنین، ۱۵۰ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل قبل از کاشت و همزمان با عملیات آماده‌سازی زمین، مصرف شد. کود آبیاری اسید هیومیک به مقدار ۵ کیلوگرم در هکتار در دو مرحله ۵ تا ۸ برگی و ۱۶ تا ۱۸ برگی در ابتدای زمین به آب آبیاری اضافه گردید. محلول‌پاشی اسید آمینه نیز به مقدار یک کیلوگرم در هکتار با غلظت پنج در هزار در همان مراحل انجام شد. ترکیبات اشاره شده، همگی از منبع تجاری مورد تأیید مؤسسه تحقیقات خاک و آب بود. اسید هیومیک استفاده شده دارای ۵۲/۹۵ درصد هیومیک اسید و اسید آمینه فاقد نیتروژن معدنی بوده و حاوی ۳۶/۷۹ درصد اسید آمینه آزاد بود. در کل، نیتروژن در ساختار اسیدهای آمینه به صورت آلی و بخشی از گروه آمین یا در زنجیره جانبی برخی اسیدهای آمینه (مانند آرژنین) وجود دارد. آبیاری به روش کرتی انجام شد و کسری رطوبت خاک ناحیه عمق توسعه ریشه (۶۰ سانتی‌متر) با دستگاه TDR پایش شد تا رطوبت خاک بعد از هر آبیاری به ظرفیت زراعی برسد. معیار

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad \text{رابطه (۱)}$$

d_i^+ و d_i^- به ترتیب فاصله گزینه i از ایده‌آل منفی و مثبت است. بدین ترتیب، تیماری که بیشترین نزدیکی را به شرایط ایده‌آل و بیشترین فاصله را از شرایط ضدایده‌آل داشت، به‌عنوان گزینه برتر معرفی گردید.

منطق وزن‌دهی و جهت معیارها در ماتریس تصمیم

در روش TOPSIS، هر معیار با یک وزن مشخص اهمیت نسبی خود را در تصمیم‌گیری نشان می‌دهد. در این پژوهش، برای سادگی و شفافیت، وزن همه معیارها برابر (یکسان) در نظر گرفته شد، زیرا هدف بررسی اثر کلی تیمارهای محرک رشد روی مجموعه‌ای از صفات کمی و کیفی بود و تمایل داشتیم هیچ معیاری به صورت پیش‌فرض بر دیگر معیارها غلبه نکند. این انتخاب همچنین امکان مقایسه مستقیم تیمارها در شرایط مختلف آبیاری را فراهم می‌کند و اثرات تنش خشکی یا تیمار محرک رشد را به صورت متعادل ارزیابی می‌کند. معیارهای ماتریس تصمیم در دو جهت مثبت و منفی تعریف شدند بدین معنی که معیار مثبت به معنای بیشتر بهتر و معیار منفی به معنای کمتر بهتر بود. با این رویکرد، مقادیر معیارهای منفی قبل از محاسبه شاخص TOPSIS معکوس یا نرمال‌سازی شدند تا جهت همه معیارها به سمت افزایش مطلوبیت باشد. این کار تضمین می‌کند که شاخص نهایی TOPSIS نشان‌دهنده نزدیکی هر تیمار به راه‌حل ایده‌آل (Ideal solution) باشد و تیماری که بیشترین همخوانی با تمام ویژگی‌های مطلوب داشته باشد، بالاترین امتیاز و رتبه را کسب کند. ماتریس تصمیم تحلیل چندمعیاره (جدول ۳ و ۴) بر اساس تیمارهای محرک رشد در دو شرایط آبیاری نرمال و تنش خشکی و با معیارهای مورد ارزیابی شامل عملکرد ریشه، وزن غده، نیتروژن مضره، قلیائیت، درصد ماده خشک خمیر ریشه، قند قابل استحصال و درصد قند خالص تشکیل شد. این معیارها بر اساس اهمیت و اولویت‌های پژوهش انتخاب و در ماتریس تصمیم تحلیل چندمعیاره مورد ارزیابی قرار گرفتند تا گزینه‌های مختلف (تیمارهای آبیاری) بر اساس معیارهای تعیین شده ارزیابی و مقایسه شوند.

علاوه بر این، درصد ماده خشک خمیر ریشه از نسبت وزن خشک ریشه به وزن تر ریشه با خشک کردن نمونه‌ها در ۷۰ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت مشخص شد (AOAC, 2000). تمامی اندازه‌گیری‌ها در شرایط یکسان و با دقت آزمایشگاهی انجام شد تا قابلیت تکرار و اطمینان از صحت داده‌ها تضمین گردد.

تجزیه آماری

پیش از تحلیل داده‌ها، وجود داده‌های پرت با آزمون کولموگوروف-اسمیرنوف^۲ و نرمال بودن داده‌ها روی باقیمانده‌های مدل با آزمون شاپیرو-ویلک بررسی شد. سپس تجزیه واریانس (ANOVA) انجام و مقایسه میانگین‌ها در صورت معنی‌دار بودن اثرات با آزمون دانکن در سطوح خطای یک و پنج درصد صورت گرفت. تحلیل‌ها با نرم‌افزار SAS نسخه 9.4 انجام شد. به منظور رعایت ساختار خطای طرح اسپلیت پلات، از مدل خطی آمیخته (Mixed Model) با رویه PROC MIXED بهره گرفته شد. در این مدل، بلوک و برهمکنش بلوک × آبیاری به‌عنوان اثرات تصادفی و سطوح آبیاری، تیمارهای محرک رشد و اثر متقابل آن‌ها به‌عنوان اثرات ثابت مدل لحاظ شدند. اثر عامل آبیاری بر اساس میانگین مربعات خطای کرت اصلی (Block × Irrigation) و اثر تیمارهای محرک رشد و اثر متقابل آبیاری × تیمار محرک رشد بر اساس خطای کرت فرعی (Residual error) آزمون شد. با توجه به اینکه اثر متقابل معنی‌دار بود مقایسه میانگین اثرات اصلی با روش LSMeans انجام شد تا اثر برهمکنش عوامل را حذف و مقایسه دارای اعتبار گردد.

تحلیل چندمعیاره به منظور شناسایی تیمار برتر

به منظور شناسایی تیمار برتر، از تصمیم‌گیری چندمعیاره به روش تاپسیس (TOPSIS) استفاده شد. این روش امکان مقایسه هم‌زمان چند معیار با واحدهای مختلف را فراهم می‌سازد و با وزن‌دهی بر اساس اهمیت هر معیار، انتخاب بهینه را تسهیل می‌کند (Hwang and yoon, 1981). برای اجرای این روش، داده‌های معیارها ابتدا با استفاده از نرمال‌سازی برداری به مقیاس بدون بعد تبدیل شدند تا مقایسه میان معیارهای مختلف با واحدها و دامنه‌های متفاوت امکان‌پذیر باشد. مقادیر نرمال‌شده سپس وزن‌دهی شده و فاصله هر گزینه از راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی محاسبه شد تا رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها انجام گیرد. تیمارها بر اساس شاخص شباهت به ترتیب نزولی رتبه‌بندی شدند. این شاخص با رابطه زیر محاسبه شد:

² Kolmogorov-Smirnov

جدول ۳ - ماتریس تصمیم تحلیل چندمعیاره در تحت آبیاری نرمال (بدون تنش)

Table 3. Decision Matrix of Multi-Criteria Analysis under Normal Irrigation (No Stress)

| قند خالص Purity (%) (+) | قند قابل استحصال Recoverable sugar (%) (+) | ماده خشک خمیر ریشه Root pulp dry matter (%) (+) | قلیائیت Alkalinity (-) | نیترژن مضره Reducing nitrogen (mmol per 100 g root pulp) (-) | وزن ریشه Root weight (kg) (+) | عملکرد ریشه Root yield (t ha ⁻¹) (+) | گزینه‌ها/معیارها Options / Criteria |
|-------------------------------------|---|--|------------------------------|---|--|--|--|
| 14.8 | 10.9 | 21.8 | 1.9 | 5.1 | 0.93 | 74.6 | شاهد (Control) |
| 15.5 | 11.5 | 22.8 | 1.9 | 5.0 | 0.98 | 78.4 | اسید آمینه (Amino acid treatment) |
| 14.2 | 10.0 | 21.4 | 2.0 | 5.1 | 1.06 | 82.7 | اسید هیومیک (Humic acid treatment) |
| 12.5 | 8.3 | 18.8 | 2.8 | 3.8 | 1.14 | 84.2 | مصرف تلفیقی (Combined treatment) |

جدول ۴ - ماتریس تصمیم تحلیل چندمعیاره در تحت تنش آبیاری

Table 4. Decision Matrix of Multi-Criteria Analysis under Stress Irrigation

| قند خالص Purity (%) (+) | قند قابل استحصال Recoverable sugar (%) (+) | ماده خشک خمیر ریشه Root pulp dry matter (%) (+) | قلیائیت Alkalinity (-) | نیترژن مضره Reducing nitrogen (mmol per 100 g root pulp) (-) | وزن ریشه Root weight (kg) (+) | عملکرد ریشه Root yield (t ha ⁻¹) (+) | گزینه‌ها/معیارها Options / Criteria |
|-------------------------------------|---|--|------------------------------|---|---|---|--|
| 15.7 | 11.4 | 24.5 | 1.8 | 5.9 | 0.59 | 51.2 | شاهد (Control) |
| 16.0 | 11.9 | 23.9 | 1.7 | 5.8 | 0.74 | 59.3 | اسید آمینه (Amino acid treatment) |
| 15.7 | 11.3 | 23.2 | 1.8 | 5.9 | 0.82 | 65.9 | اسید هیومیک (Humic acid treatment) |
| 15.9 | 12.0 | 23.5 | 1.5 | 6.1 | 0.87 | 68.4 | مصرف تلفیقی (Combined treatment) |

نتایج

نتایج تجزیه واریانس آماری

نتایج تجزیه واریانس صفات کمی و کیفی چغندر قند (جدول ۵) نشان داد که اثر تیمارهای آبیاری، محرک رشد و برهمکنش آن‌ها بسته به نوع صفت متفاوت بوده است. آبیاری به‌عنوان کورت اصلی، اثر بسیار معنی‌داری (سطح احتمال یک درصد) بر عملکرد ریشه و وزن ریشه داشت که بیانگر نقش تعیین‌کننده تأمین آب در افزایش تولید زیست‌توده و عملکرد نهایی چغندر قند است. همچنین اثر آبیاری بر نیترژن مضره، ماده خشک خمیر ریشه و قند خالص نیز در سطح یک درصد معنی‌دار شد. این نتایج نشان می‌دهد که تغییر در رژیم آبیاری علاوه بر کمیت تولید، می‌تواند کیفیت ریشه و ترکیبات شیمیایی مرتبط با استخراج قند را نیز تحت تأثیر قرار دهد. علاوه بر این، اثر آبیاری بر قلیائیت و قند قابل استحصال در سطح پنج درصد معنی‌دار بود که حاکی از حساسیت این صفات کیفی به شرایط رطوبتی خاک است. در مقابل، اثر آبیاری بر وزن تر خمیر ریشه، وزن خشک خمیر ریشه، پتاسیم، سدیم، قند ملاس و ضریب استحصال معنی‌دار نبود که نشان می‌دهد این صفات از پایداری نسبی بیشتری نسبت به تغییرات آبیاری برخوردارند.

تحلیل حساسیت نتایج رتبه‌بندی تیمارها نسبت به

وزن معیارها

به منظور بررسی حساسیت نتایج رتبه‌بندی تیمارها در TOPSIS نسبت به وزن معیارها، تحلیل عدم قطعیت وزن‌ها با استفاده از روش مونت‌کارلو انجام شد. در این روش، به جای استفاده از وزن‌های ثابت، در هر تکرار وزن‌ها به صورت تصادفی تولید و به گونه‌ای نرمال‌سازی شدند که مجموع آنها برابر با یک باشد. الگوریتم TOPSIS برای هر مجموعه وزن اجرا شد و رتبه تیمارها ثبت گردید. این فرآیند در ۱۰۰۰۰ تکرار انجام شد تا احتمال کسب رتبه اول برای هر تیمار و توزیع فراوانی رتبه‌ها به دست آید. نتایج حاصل به عنوان تحلیل پایداری (Stability analysis) برای سنجش حساسیت رتبه‌بندی‌ها نسبت به تغییر وزن معیارها مورد استفاده قرار گرفت. تمام محاسبات و تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار Python و کتابخانه‌های pandas و NumPy انجام شد.

به طوری که آبیاری نرمال با میانگین ۷۹/۹۸ تن در هکتار بیشترین عملکرد ریشه را به خود اختصاص داد و به طور معنی‌داری نسبت به تیمار تنش خشکی برتری داشت. همچنین وزن ریشه در شرایط آبیاری نرمال به طور معنی‌داری بیشتر از شرایط خشکی بود. اثر آبیاری بر وزن تر خمیر ریشه و وزن خشک خمیر ریشه معنی‌دار نبود که نشان می‌دهد این صفات نسبت به تغییرات رژیم آبیاری حساسیت کمتری داشته‌اند. از نظر صفات شیمیایی، اختلاف معنی‌داری بین سطوح آبیاری برای نیتروژن مضره، پتاسیم، سدیم و قلیائیت مشاهده نشد. در مقابل، ماده خشک خمیر ریشه تحت تأثیر آبیاری قرار گرفت و تیمار تنش خشکی مقدار بیشتری از ماده خشک خمیر ریشه را نسبت به آبیاری نرمال نشان داد. همچنین تفاوت معنی‌داری بین سطوح آبیاری از نظر قند خالص مشاهده شد، به طوری که تیمار خشکی مقدار بیشتری قند خالص تولید کرد. سایر صفات شامل قند ملاس، ضریب استحصال و قند قابل استحصال تحت تأثیر آبیاری قرار نگرفتند.

اثر اصلی محرک‌های رشد بر صفات کمی و کیفی چغندر قند

بر اساس نتایج (جدول ۷)، تیمارهای محرک رشد اثر معنی‌داری بر عملکرد ریشه و وزن ریشه داشتند. بیشترین عملکرد ریشه مربوط به تیمار مصرف تلفیقی محرک رشد و پس از آن اسید هیومیک بود، در حالی که کمترین عملکرد به تیمار شاهد اختصاص داشت. وزن ریشه نیز در تیمار مصرف تلفیقی محرک رشد بیشترین مقدار و در تیمار شاهد کمترین مقدار را نشان داد. اثر محرک‌های رشد بر وزن تر خمیر ریشه و وزن خشک خمیر ریشه محدود بوده و فقط در برخی تیمارها اختلاف معنی‌دار مشاهده شد. از نظر صفات کیفی شامل نیتروژن مضره، پتاسیم، سدیم و قلیائیت، اختلاف معنی‌داری بین تیمارهای محرک رشد مشاهده نشد. ماده خشک خمیر ریشه تحت تأثیر تیمارهای محرک رشد قرار گرفت، به طوری که کمترین مقدار آن در تیمار مصرف تلفیقی محرک رشد مشاهده شد. تیمارهای محرک رشد تأثیر معنی‌داری بر قند ملاس، ضریب استحصال و قند قابل استحصال نداشتند. با این حال، از نظر قند خالص، اختلاف معنی‌داری بین تیمارها مشاهده شد و تیمار اسید آمینه بیشترین مقدار قند خالص را به خود اختصاص داد، در حالی که کمترین مقدار مربوط به تیمار مصرف تلفیقی محرک رشد بود.

اثر تیمارهای محرک رشد (کرت فرعی) بر عملکرد ریشه و وزن ریشه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود که بیانگر تأثیر مثبت این ترکیبات بر رشد و توسعه ریشه چغندر قند بود. این نتیجه نشان می‌دهد که استفاده از محرک‌های رشد می‌تواند از طریق بهبود فرآیندهای فیزیولوژیکی و افزایش رشد رویشی، موجب افزایش عملکرد شود. با این حال، اثر محرک‌های رشد بر اغلب صفات کیفی شامل نیتروژن مضره، پتاسیم، سدیم، قلیائیت، ماده خشک خمیر ریشه، قند ملاس، ضریب استحصال، قند قابل استحصال و قند خالص معنی‌دار نبود. این موضوع بیانگر آن است که محرک‌های رشد در شرایط این آزمایش، بیش از آن که موجب تغییرات شیمیایی در ترکیب ریشه شوند، نقش خود را در افزایش کمیت تولید ایفا کرده‌اند.

برهمکنش آبیاری و محرک رشد تنها بر وزن ریشه در سطح یک درصد و بر وزن تر خمیر ریشه در سطح پنج درصد معنی‌دار شد، در حالی که برای سایر صفات اثر متقابل معنی‌داری مشاهده نشد. معنی‌دار بودن این برهمکنش نشان می‌دهد که واکنش ریشه چغندر قند از نظر تجمع ماده تر به تیمارهای محرک رشد، تحت شرایط مختلف رطوبتی متفاوت است. عدم معنی‌داری اثر متقابل برای اغلب صفات بیانگر آن است که پاسخ این صفات به محرک‌های رشد در دو شرایط آبیاری نرمال و تنش خشکی الگوی نسبتاً مشابهی داشته و اثر محرک‌ها مستقل از شرایط آبیاری بوده است.

مقادیر ضریب تغییرات (CV) برای صفات مختلف در دامنه قابل قبول قرار داشت و کمترین مقدار آن مربوط به عملکرد ریشه بود که نشان‌دهنده دقت مناسب آزمایش و یکنواختی شرایط اجرایی است. این امر اعتبار نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس را تأیید می‌کند. به طور کلی، نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد که آبیاری مهم‌ترین عامل مؤثر بر عملکرد و برخی صفات کیفی چغندر قند بوده است، در حالی که محرک‌های رشد عمدتاً با افزایش رشد و عملکرد ریشه نقش اصلاح‌کننده ایفا کرده‌اند. همچنین، محدود بودن اثر متقابل آبیاری و محرک رشد بیانگر آن است که اثر محرک‌ها در بیشتر صفات مستقل از شرایط رطوبتی بوده است.

اثر اصلی آبیاری بر صفات کمی و کیفی چغندر قند

نتایج (جدول ۶) نشان داد که سطوح مختلف آبیاری اثر معنی‌داری بر عملکرد ریشه و وزن ریشه چغندر قند داشت.

جدول ۵ - تجزیه واریانس (میانگین مربعات) برخی خصوصیات کمی و کیفی چغندر قند
 Table 5. Analysis of Variance (Mean Squares) of Some Quantitative and Qualitative Traits of Sugar Beet

| قند خالص Purity | قند قابل استحصال Recoverable sugar | ضریب استحصال Extraction coefficient | قند ملاس Molasses sugar | ماده خشک خمیر ریشه Root pulp dry matter | قلیائیت Alkalinity | سدیم Na | پتاسیم K | نیترोजن مضره Reducing nitrogen | وزن تر خمیر ریشه Fresh weight of root pulp | وزن خشک خمیر ریشه Dry weight of root pulp | وزن ریشه Root weight | عملکرد ریشه Root yield | درجه آزادی Degrees of freedom (df) | منابع تغییر Source of variation |
|-----------------------|---|--|-------------------------------|---|-----------------------|--------------------|--------------------|---|--|--|-------------------------------|---------------------------------|--|--|
| 0.2 ^{ns} | 0.46 ^{ns} | 6.52 ^{ns} | 0.1 ^{ns} | 1.2 ^{ns} | 0.08 ^{ns} | 0.11 ^{ns} | 0.53 ^{ns} | 0.09 ^{ns} | 2.11 ^{ns} | 0.07 ^{ns} | 0.003 ^{**} | 13.27 ^{ns} | 2 | بلوک Block |
| 14.49 ^{**} | 13.01 [*] | 40.64 ^{ns} | 0.04 ^{ns} | 39.99 ^{**} | 1.43 [*] | 0.34 ^{ns} | 0.59 ^{ns} | 7.9 ^{**} | 1.51 ^{ns} | 0.56 ^{ns} | 0.440 ^{**} | 2120.64 ^{**} | 1 | آبیاری (کرت اصلی) Irrigation (main plot) |
| 0.83 | 1.07 | 9.74 | 0.12 | 1.24 | 0.25 | 0.56 | 0.16 | 0.90 | 3.16 | 0.18 | 0.00 | 0.28 | 2 | خطای آبیاری (بلوک در آبیاری) خطای آبیاری (بلوک در آبیاری) |
| 2.62 ^{ns} | 2.72 ^{ns} | 15.2 ^{ns} | 0.06 ^{ns} | 3.24 ^{ns} | 0.13 ^{ns} | 0.44 ^{ns} | 0.02 ^{ns} | 0.48 ^{ns} | 3.28 ^{ns} | 0.26 ^{ns} | 0.067 ^{**} | 216.82 ^{**} | 3 | محرک رشد (کرت فرعی) Growth stimulator (sub-plot) |
| 2.52 ^{ns} | 3.57 ^{ns} | 30.85 ^{ns} | 0.12 ^{ns} | 3.63 ^{ns} | 0.42 ^{ns} | 0.42 ^{ns} | 0.38 ^{ns} | 0.83 ^{ns} | 6.58 [*] | 0.12 ^{ns} | 0.0035 ^{**} | 17.59 ^{ns} | 3 | آبیاری × محرک رشد Irrigation × Growth stimulator |
| 1.2 | 1.68 | 18.43 | 0.26 | 1.86 | 0.15 | 0.82 | 0.43 | 0.45 | 1.53 | 0.12 | 0.0002 | 5.28 | 12 | خطای کل Total error |
| 7.27 | 11.9 | 5.96 | 14.4 | 6.06 | 20.8 | 19.6 | 12.5 | 12.5 | 7.95 | 10.03 | 1.69 | 3.26 | - | ضریب تغییرات Coefficient of variation (CV) |

ns, * و ** به ترتیب نشان دهنده عدم معنی‌داری، اثر معنی‌دار در سطح پنج درصد و در سطح یک درصد می‌باشد.

ns, * and ** indicate non-significant, significant at 5%, and significant at 1% levels, respectively.

جدول ۶ - مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمارهای آبیاری برای صفات معنی‌دار

Table 6. Comparison of means of main effects of irrigation treatments for significant traits

| قند خالص Purity (%) | قند قابل استحصال Recoverable sugar (%) | ماده خشک خمیر ریشه Root pulp dry matter (%) | قلیائیت Alkalinity (%) | نیترژن مضره Reducing nitrogen (mmol per 100 g root pulp) | وزن تر ریشه Root weight (kg) | عملکرد ریشه Root yield (t ha ⁻¹) | سطوح آبیاری Irrigation levels |
|------------------------|---|---|---------------------------|---|------------------------------------|--|----------------------------------|
| 14.3 ^b | 10.2 ^b | 21.2 ^b | 2.2 ^a | 4.7 ^b | 1.03 ^a | 79.98 ^a | نرمال (Normal) |
| 15.8 ^a | 11.8 ^a | 23.8 ^a | 1.7 ^b | 5.9 ^a | 0.76 ^b | 61.2 ^b | خشکی (Drought) |

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف آماری مشترک هستند، بر اساس آزمون دانکن تفاوت آماری معنی‌داری ندارند.

Means sharing the same statistical letters are not significantly different according to Duncan's test.

جدول ۷ - مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمارهای محرک رشد برای صفات معنی‌دار

Table 7. Comparison of means of main effects of growth stimulant treatments for significant traits

| وزن ریشه Root weight (kg) | عملکرد ریشه Root yield (t ha ⁻¹) | محرک های رشد Growth stimulators |
|------------------------------|---|------------------------------------|
| 0.76 ^d | 62.9 ^c | شاهد (Control) |
| 0.86 ^c | 68.9 ^b | اسید آمینه (Amino acid treatment) |
| 0.94 ^b | 74.3 ^a | اسید هیومیک (Humic acid treatment) |
| 1.01 ^a | 76.3 ^a | مصرف تلفیقی (Combined treatment) |

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف آماری مشترک هستند، بر اساس آزمون دانکن تفاوت آماری معنی‌داری ندارند.

Means sharing the same statistical letters are not significantly different according to Duncan's test.

اثر متقابل آبیاری و محرک رشد بر صفات کمی و کیفی چغندر قند

نسبت به شاهد نشان دادند. بیشترین وزن ریشه در شرایط آبیاری نرمال با مصرف تلفیقی محرک رشد مشاهده شد. اثر متقابل آبیاری و محرک رشد بر وزن تر خمیر ریشه هم معنی‌دار بود و در شرایط آبیاری نرمال تیمار مصرف تلفیقی محرک رشد رتبه اول و در شرایط تنش خشکی تیمار شاهد بالاترین رتبه را کسب کرد.

نتایج (جدول ۸) نشان داد وزن ریشه تحت تأثیر برهمکنش آبیاری و محرک رشد قرار گرفت، به طوری که در هر دو سطح آبیاری، تیمارهای دارای محرک رشد مقادیر بیشتری

جدول ۸ - مقایسه میانگین اثرات متقابل آبیاری در محرک رشد برای صفات معنی‌دار

Table 8. Comparison of means of the interaction effects of irrigation and growth stimulants for significant traits

| وزن تر خمیر ریشه Fresh weight of root pulp (g) | وزن ریشه Root weight (kg) | تیمار Treatment | سطوح آبیاری Irrigation levels |
|---|------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| 15.7 ^{ab} | 0.93 ^d | شاهد (Control) | نرمال (Normal) |
| 13.9 ^b | 0.98 ^c | اسید آمینه (Amino acid treatment) | |
| 16.1 ^{ab} | 1.06 ^b | اسید هیومیک (Humic acid treatment) | |
| 17.4 ^a | 1.14 ^a | مصرف تلفیقی (Combined treatment) | |
| 16.7 ^a | 0.59 ^d | شاهد (Control) | خشکی (Drought) |
| 15.1 ^{ab} | 0.74 ^c | اسید آمینه (Amino acid treatment) | |
| 15.3 ^{ab} | 0.82 ^b | اسید هیومیک (Humic acid treatment) | |
| 14.0 ^b | 0.87 ^a | مصرف تلفیقی (Combined treatment) | |

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف آماری مشترک هستند، بر اساس آزمون دانکن تفاوت آماری معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

Means sharing the same statistical letters are not significantly different according to Duncan's test.

حجم آب مصرفی

بین آبیاری‌ها حدود هشت روز برآورد شد که این الگو از نظر مدیریتی نزدیک به شرایط آبیاری نرمال بوده و امکان تأمین پیوسته آب مورد نیاز گیاه را فراهم می‌کند. تعداد دفعات آبیاری در این سطح نسبتاً بالا (۲۴ نوبت) بود، اما به دلیل عمق کمتر هر نوبت آبیاری، این روش از نظر عملی برای مدیریت دقیق رطوبت خاک و کاهش نوسانات تنش آبی در ناحیه ریشه مناسب ارزیابی شد. با این برنامه مدیریت آبیاری، مجموع حجم آب مصرفی ۹۸۴۰ مترمکعب در هکتار اندازه‌گیری شد.

بر اساس جدول مقایسه‌ای سطوح آبیاری (جدول ۹)، نتایج نشان داد که افزایش آستانه تبخیر تجمعی از میانگین سطح ۷۵ میلی‌متر به ۱۳۵ میلی‌متر، منجر به تغییر معنی‌دار در الگوی آبیاری از نظر فاصله بین آبیاری، حجم آب مصرفی در هر نوبت و تعداد دفعات آبیاری در طول دوره رشد ۱۸۰ روزه شد. در برنامه آبیاری بر اساس ۸۰-۷۰ میلی‌متر تبخیر تجمعی از تشت تبخیر کلاس A، میانگین عمق آب آبیاری برابر با ۴۱ میلی‌متر و فاصله

جدول ۹ - برنامه آبیاری تیمارهای مختلف آبیاری

Table 9. Irrigation schedule for different irrigation treatments

| حجم آب مصرفی کل Total irrigation amount (m ³ ha ⁻¹) | تعداد دفعات آبیاری (کل دوره رشد) Number of irrigations (entire growth period) | میانگین فاصله بین هر آبیاری Average interval between irrigations (days) | میانگین عمق آب آبیاری در هر نوبت Average irrigation amount per event (m ³ ha ⁻¹) | | برنامه آبیاری Irrigation schedule |
|--|--|--|--|----------------------------------|--------------------------------------|
| | | | میانگین عمق آب آبیاری در هر نوبت | میانگین عمق آب آبیاری در هر نوبت | |
| 9840 | 24 | 8 | 410 | 410 | آبیاری در شرایط نرمال |
| 8640 | 16 | 10-11 | 540 | 540 | آبیاری در شرایط تنش |

هیومیک با امتیاز ۰/۵۷۷ در رتبه سوم قرار گرفت که اختلاف اندک آن با تیمار شاهد بیانگر اثرات مثبت ولی محدود این تیمار در بهبود هم‌زمان عملکرد و کیفیت است. این نتیجه می‌تواند ناشی از وابستگی شدید پاسخ گیاه به دز مصرف و شرایط محیطی در کاربرد اسید هیومیک باشد. در مقابل، تیمار مصرف تلفیقی محرک رشد با کمترین امتیاز نزدیکی (۰/۳۸) در رتبه چهارم قرار گرفت که نشان‌دهنده فاصله قابل توجه این تیمار از راه‌حل ایده‌آل است. این امر بیانگر آن است که مصرف هم‌زمان محرک‌های رشد در شرایط این پژوهش نتوانسته است بهبود هماهنگ و متعادلی در معیارهای مورد ارزیابی ایجاد کند و حتی در برخی صفات کیفی از جمله افزایش نیتروژن‌های مضره و آلکالیت، اثر منفی بر کیفیت شربت چغندر قند داشته است. به‌طور کلی، نتایج تاپسیس نشان می‌دهد که در شرایط آزمایش حاضر، کاربرد اسید آمینه به‌عنوان مؤثرترین و متعادل‌ترین تیمار برای بهبود هم‌زمان عملکرد و کیفیت چغندر قند قابل توصیه است، در حالی که تیمار مصرف تلفیقی محرک رشد نیازمند بازنگری در ترکیب، دز مصرف و زمان کاربرد پیش از توصیه عمومی است.

در مقابل، افزایش تبخیر تجمعی از تشت تبخیر به ۱۴۰-۱۳۰ میلی‌متر، باعث افزایش فاصله بین آبیاری‌ها به حدود ۱۰ تا ۱۱ روز شد که همراه با افزایش عمق آبیاری در هر نوبت به حدود ۵۴ میلی‌متر شد. تعداد دفعات آبیاری و حجم آب مصرفی به ترتیب به ۱۶ نوبت و ۸۶۴۰ مترمکعب در هکتار کاهش یافت. این الگوی آبیاری اگرچه از نظر کاهش دفعات آبیاری و سهولت اجرایی برای مدیریت مزرعه مطلوب‌تر به نظر می‌رسد، اما به دلیل افزایش فاصله بین آبیاری‌ها منجر به بروز تنش خشکی در برخی مراحل حساس رشد چغندر قند شد.

تحلیل چندمعیاره

تحلیل چندمعیاره عملکرد تیمارهای محرک رشد در شرایط آبیاری نرمال (آبیاری بدون تنش)

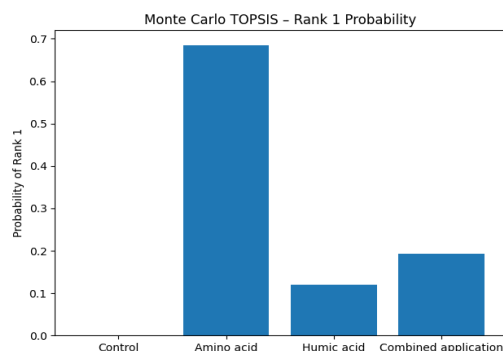
نتایج حاصل از رتبه‌بندی تیمارها به روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس (شکل ۱- الف) نشان داد که تیمارهای مورد بررسی از نظر عملکرد و صفات کمی و کیفی چغندر قند دارای تفاوت مشخصی در میزان نزدیکی به راه‌حل ایده‌آل هستند. بر اساس امتیاز نزدیکی تاپسیس (جدول ۱۰)، تیمار اسید آمینه با کسب بالاترین مقدار (۰/۶۶۱) در رتبه اول قرار گرفت که بیانگر بیشترین شباهت این تیمار به حالت ایده‌آل و کمترین فاصله از بدترین وضعیت در میان تیمارها است. تیمار اسید

جدول ۱۰- رتبه‌بندی تیمارهای محرک رشد به روش تاپسیس با مجموعه معیارهای مختلف با وزن نسبی یکسان
Table 10. Ranking of Growth Stimulator Treatments Using TOPSIS Method with Different Sets of Criteria and Equal Relative Weights

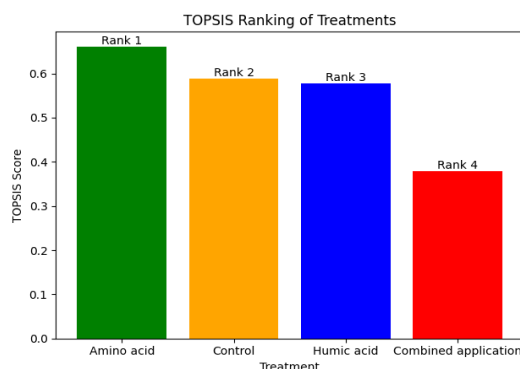
| آبیاری نرمال (بدون تنش) Normal irrigation (no stress) | معیارها criteria |
|--|---|
| رتبه اول: اسید آمینه (0.661) Rank 1: Amino acid treatment (0.661) | عملکرد ریشه، وزن ریشه، نیتروژن مضره، آلكالیتیه، درصد ماده خشک خمیر ریشه، درصد قند قابل استحصال و درصد قند خالص Root yield, Root weight, Reducing nitrogen, Alkalinity, Root pulp dry matter, Recoverable sugar, Purity |
| رتبه دوم: شاهد (0.588) Rank 2: Control (0.588) | |
| رتبه سوم: اسید هیومیک (0.577) Rank 3: Humic acid treatment (0.577) | |
| رتبه چهارم: مصرف تلفیقی محرک رشد (0.380) Rank 4: Combined growth stimulator treatment (0.380) | |

شبیه‌سازی‌ها توانسته است رتبه اول را نیز کسب کند. این الگو حاکی از حساسیت بالای این تیمار به وزن معیارها و ناپایداری عملکرد آن در شرایط تصمیم‌گیری نامطمئن است. تیمار اسید هیومیک عمدتاً در رتبه سوم قرار گرفته و تنها در درصد محدودی از شبیه‌سازی‌ها رتبه اول را به خود اختصاص داده است که نشان‌دهنده عملکرد متوسط و نسبتاً پایدار اما فاقد برتری مشخص نسبت به سایر تیمارها است. تیمار شاهد نیز عمدتاً در رتبه‌های دوم و سوم قرار داشته و در هیچ‌یک از شبیه‌سازی‌ها رتبه اول را کسب نکرده است که بیانگر عدم مزیت رقابتی آن نسبت به تیمارهای محرک رشد است.

نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو مبتنی به منظور تحلیل حساسیت رتبه‌بندی تیمارها نسب به تغییر وزن معیارها (شکل ۱-ب) نشان داد که رتبه‌بندی تیمارهای مورد بررسی در برابر عدم قطعیت وزن معیارهای کیفی از پایداری یکسانی برخوردار نیست. بر اساس جدول احتمال رتبه‌ها، تیمار اسید آمینه با کسب رتبه اول در حدود ۶۹ درصد از کل شبیه‌سازی‌ها و عدم حضور در رتبه چهارم، به‌عنوان پایدارترین و مطمئن‌ترین گزینه شناسایی شد. این موضوع بیانگر آن است که برتری این تیمار وابستگی اندکی به نحوه وزن‌دهی معیارها دارد و حتی در شرایط تغییر اولویت معیارهای کیفی، عملکرد آن در سطح مطلوب باقی می‌ماند. در مقابل، تیمار مصرف تلفیقی محرک رشد بیشترین احتمال فرارگیری در رتبه چهارم را نشان داد، اگرچه در بخشی از



(ب)



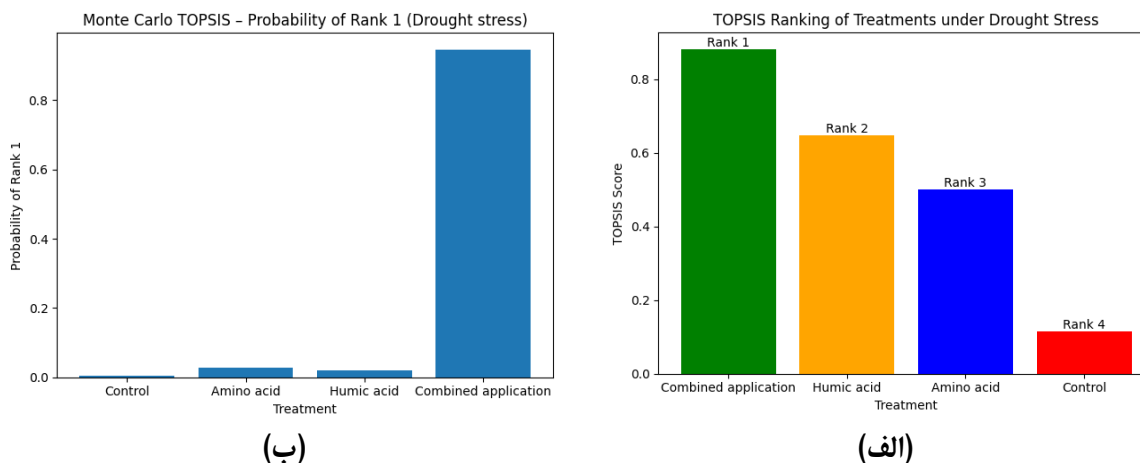
(الف)

شکل ۱- نمودار رتبه‌بندی و آنالیز حساسیت تیمارهای محرک رشد در شرایط آبیاری بدون تنش
Figure 1. Ranking and Sensitivity Analysis of Growth Stimulator Treatments under No-Stress Irrigation Conditions

نمود. نتایج تاپسیس نشان داد که تیمار مصرف تلفیقی محرک رشد بیشترین نزدیکی را به راه‌حل ایده‌آل دارد (جدول ۱۱ و شکل ۲-الف) و این برتری با نتایج مونت کارلو (شکل ۲-ب) نیز به‌طور کامل تأیید شد؛ به‌طوری‌که این تیمار در حدود ۹۵ درصد از سناریوهای وزن‌دهی تصادفی معیارها رتبه اول را به خود اختصاص داد.

تحلیل چندمعیاره عملکرد تیمارهای محرک رشد در شرایط آبیاری با تنش خشکی

در شرایط تنش خشکی، تلفیق نتایج حاصل از رتبه‌بندی قطعی تاپسیس و شبیه‌سازی مونت کارلو امکان تحلیل عمیق‌تر و واقع‌بینانه‌تری از کارایی تیمارهای محرک رشد فراهم



شکل ۲- نمودار رتبه‌بندی و آنالیز حساسیت تیمارهای محرک رشد در شرایط تنش خشکی

Figure 2. Ranking and Sensitivity Analysis of Growth Stimulator Treatments under Drought Stress Conditions

جدول ۱۱- رتبه‌بندی تیمارهای محرک رشد به روش تاپسیس با مجموعه معیارهای مختلف با وزن نسبی یکسان

Table 11. Ranking of Growth Stimulator Treatments Using TOPSIS Method with Different Sets of Criteria and Equal Relative Weights

| آبیاری با تنش خشکی Drought stress irrigation | معیارها criteria |
|--|---|
| رتبه اول: مصرف تلفیقی محرک رشد (0.883) Rank 1: Combined growth stimulator treatment (0.883) | عملکرد ریشه، وزن ریشه، نیتروژن مضره، آلكالیت، درصد ماده خشک خمیر ریشه، درصد قند قابل استحصال و درصد قند خالص Root yield, Root weight, Reducing nitrogen, Alkalinity, Root pulp dry matter, Recoverable sugar, Purity |
| رتبه دوم: اسید هیومیک (0.648) Rank 2: Humic acid treatment (0.648) | |
| رتبه سوم: اسید آمینه (0.501) Rank 3: Amino acid treatment (0.501) | |
| رتبه چهارم: شاهد (0.115) Rank 4: Control (0.115) | |

دهد که تحت تنش خشکی، تجمع ترکیبات محلول و کاهش محتوای آب به‌عنوان سازوکار تنظیم اسمزی، به حفظ تعادل سلولی کمک می‌کند.

تیمارهای محرک رشد، به‌ویژه مصرف تلفیقی محرک‌ها و اسید هیومیک، موجب افزایش معنی‌دار عملکرد ریشه و وزن ریشه شدند، در حالی‌که تأثیر آن‌ها بر اغلب صفات کیفی معنی‌دار نبود. این یافته با نتایج Canellas و همکاران (۲۰۲۰) و du Jardin (۲۰۱۵) همراستا است که بیان کردند بیواسیمولانت‌ها عمدتاً از طریق بهبود رشد رویشی، توسعه سیستم ریشه‌ای و افزایش جذب عناصر غذایی عملکرد را افزایش می‌دهند، بدون آنکه تغییرات شدیدی در ترکیب شیمیایی محصول

بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که تنش خشکی به‌طور معنی‌داری عملکرد ریشه چغندر قند را کاهش داد، در حالی‌که موجب افزایش درصد ماده خشک خمیر ریشه و درصد قند خالص شد. کاهش رشد ریشه تحت تنش خشکی با یافته‌های Hoffmann و همکاران (۲۰۲۰) و Ghaffari و همکاران (۲۰۲۲) همخوانی دارد؛ آن‌ها کاهش عملکرد را ناشی از محدودیت فتوسنتز، کاهش هدایت روزنه‌ای و کاهش انتقال مواد فتوسنتزی به ریشه‌های ذخیره‌ای گزارش کرده‌اند. افزایش درصد ماده خشک خمیر ریشه و قند خالص نیز با نتایج Rašovský و همکاران (۲۰۲۲) و Kenter و همکاران (۲۰۱۹) مطابقت دارد و نشان می‌دهد که تیمارهای محرک رشد می‌توانند به حفظ تعادل سلولی و کاهش خسارت ناشی از تنش خشکی کمک کنند.

مطالعات خارجی نشان داده‌اند که کاربرد ترکیبی بیواستیمولانت‌ها در شرایط خشکی موجب افزایش کارایی فتوسنتز، پایداری غشای سلولی و تجمع مواد فتوسنتزی در محصولات قندی می‌شود (Calvo et al., 2014; du Jardin, 2015). همچنین پژوهش‌های داخلی و بین‌المللی حاکی از آن است که تیمارهای ترکیبی نسبت به کاربرد منفرد اسیدهای آمینه یا مواد هیومیکی اثر هم‌افزای بیشتری بر عملکرد ریشه و درصد قند خالص دارند (Sadeghi et al., 2016; Rahimi et al., 2019). تیمار اسید هیومیک در رتبه دوم قرار گرفت و به‌طور کلی عملکرد پایدار و قابل قبول داشت، اما شدت اثر آن برای رتبه اول کافی نبود که با یافته‌های پیشین در ایران و جهان همخوانی دارد (Canellas et al., 2015; al., 2014; Motaghi & Nejad, 2014). تیمار اسید آمینه نیز عمدتاً در رتبه سوم قرار گرفت و اثر آن تحت خشکی محدود بود و وابسته به شدت تنش، زمان و روش کاربرد بود (Kowalczyk et al., 2008; Mohammadi et al., 2018).

مقایسه نتایج شرایط آبیاری نشان داد که پاسخ چغندر قند به تیمارهای محرک رشد به‌شدت وابسته به وضعیت رطوبتی خاک است. تحت شرایط بدون تنش، تیمار اسید آمینه پایدار و کم‌ریسک بود، اما در شرایط خشکی، تیمار مصرف تلفیقی عملکرد و پایداری بالاتری داشت. این یافته با گزارش‌های مشابه همخوانی دارد که بیان می‌کنند ترکیب بیواستیمولانت‌ها در شرایط تنش محیطی اثرات بهتری نسبت به مصرف منفرد آن‌ها دارد، زیرا گیاه برای سازگاری نیازمند فعال‌سازی همزمان مسیرهای فیزیولوژیکی متعددی است (Rouphael & Colla, 2020; Ebrahimi et al., 2019).

با توجه به نتایج، مشاهده می‌شود که رتبه‌بندی تیمارها بر اساس TOPSIS گاهی با نتایج آزمون ANOVA همخوانی کامل ندارد. این اختلاف ناشی از ماهیت متفاوت این دو روش است؛ ANOVA تأثیر هر تیمار را بر یک صفت در سطح میانگین و مستقل از سایر صفات بررسی می‌کند، در حالی که TOPSIS با در نظر گرفتن چندین معیار همزمان و نزدیکی به راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی، رتبه‌بندی کلی عملکرد و کیفیت را ارائه می‌دهد؛ بنابراین، یک تیمار ممکن است از نظر یک صفت مشخص در ANOVA تفاوت معنی‌دار نشان ندهد، اما با توجه به اثر همزمان بر مجموعه‌ای از معیارهای کمی و کیفی، در TOPSIS عملکرد بالاتری داشته باشد. این موضوع نشان می‌دهد که TOPSIS توانایی ادغام و وزن‌دهی چندمعیاره صفات را دارد و می‌تواند گزینه‌های پایدار و بهینه در شرایط واقعی مزرعه را شناسایی کند، در حالی که ANOVA بیشتر محدود به بررسی اثر تک‌بعدی هر صفت است. این تفاوت تأکید می‌کند که تحلیل چندمعیاره مکمل

ایجاد کنند. اثر مثبت اسید هیومیک و مصرف ترکیبی، مشابه نتایج Rahimi و همکاران (۲۰۲۰) و El-Hassanin و همکاران (۲۰۱۶)، نشان‌دهنده نقش افزایش فعالیت ریشه، بهبود دسترسی به عناصر غذایی و افزایش کارایی مصرف آب در افزایش عملکرد است.

نتایج نشان داد که اثر متقابل آبیاری و محرک رشد بر وزن ریشه و وزن تر خمیر ریشه معنی‌دار است؛ این موضوع بیانگر آن است که کارایی محرک‌های رشد به شرایط رطوبتی خاک وابسته است، همان‌طور که Colla و Rouphael (۲۰۲۰) گزارش کردند. تحت تنش خشکی، برتری تیمارهای دارای محرک رشد نسبت به شاهد، نقش این ترکیبات در کاهش اثرات منفی خشکی را نشان داد؛ این موضوع با یافته‌های Bulgari و همکاران (۲۰۱۹) همخوانی دارد که نشان دادند بیواستیمولانت‌ها با افزایش فعالیت سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی، بهبود وضعیت آب گیاه و تجمع اُسمولیت‌ها، تحمل گیاهان به خشکی را افزایش می‌دهند. عدم تأثیر معنی‌دار بر برخی صفات کیفی مانند قند ملاس و ضریب استحصال نیز با گزارش Khan و همکاران (۲۰۲۱) همراستا است و نشان می‌دهد افزایش عملکرد ممکن است با رقیق شدن نسبی برخی ترکیبات کیفی همراه باشد.

از دیدگاه فیزیولوژیک، پایداری بالای تیمار اسید آمینه به اثرات مستقیم آن در بهبود فتوسنتز، جذب عناصر غذایی، تنظیم تعادل اسمزی و کاهش اثرات منفی تنش‌های محیطی نسبت داده می‌شود (Calvo et al., 2014; du Jardin, 2015; Heidari et al., 2017). اسید هیومیک نیز توسعه سیستم ریشه‌ای، جذب عناصر غذایی و خصوصیات خاک را بهبود می‌بخشد (Nardi et al., 2002; al., 2015; Canellas et al., 2015). اگرچه شدت اثر آن وابسته به دز مصرف، روش کاربرد و شرایط محیطی است؛ این موضوع می‌تواند دلیل ناپایداری نسبی عملکرد تیمار اسید هیومیک در تحلیل مونت کارلو باشد.

تحلیل مونت کارلو نشان داد که تیمار اسید آمینه گزینه‌ای پایدار و کم‌ریسک برای شرایط مختلف زراعی است، در حالی که تیمار مصرف تلفیقی با حساسیت بالا نسبت به شرایط محیطی و وزن معیارها، نیازمند ارزیابی دقیق‌تر و آزمون‌های محلی است. هم‌راستایی بین نتایج آماری کلاسیک و احتمالاتی نشان داد که برتری تیمار مصرف تلفیقی تحت تنش خشکی نه به دلیل یک صفت خاص، بلکه ناشی از بهبود همزمان مجموعه‌ای از صفات کمی و کیفی است. این برتری می‌تواند از فعال‌سازی همزمان مسیرهای سازگاری گیاه ناشی شود؛ شامل توسعه سیستم ریشه‌ای، افزایش کارایی جذب آب و عناصر غذایی، تنظیم تعادل اسمزی و تقویت سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی که اثرات منفی خشکی بر سنتز و انتقال قند را کاهش می‌دهند.

تحلیل کلاسیک آماری است و می‌تواند تصمیم‌گیری مدیریتی دقیق‌تری در انتخاب تیمارهای مؤثر ارائه دهد.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به‌عنوان یک پیش‌آزمون، تأثیر محرک‌های رشد بر عملکرد و کیفیت چغندر قند در شرایط آبیاری نرمال و تنش خشکی را بررسی کرد. نتایج مقدماتی نشان داد که تنش خشکی می‌تواند مهم‌ترین عامل محدودکننده عملکرد و وزن ریشه باشد، اگرچه ممکن است درصد ماده خشک خمیر ریشه و قند خالص ریشه افزایش یابد. محرک‌های رشد عمدتاً بر صفات کمی تأثیر داشته و به‌نظر می‌رسد که بتوانند اثرات منفی خشکی را تا حدی کاهش دهند. تحلیل چندمعیاره و شبیه‌سازی مونت کارلو نشان داد که در شرایط آبیاری نرمال، تیمار اسید آمینه و در شرایط تنش خشکی، مصرف تلفیقی محرک‌های رشد، گزینه‌های نسبتاً پایدار و کم‌ریسک به‌نظر می‌رسند. با این حال، این نتایج مقدماتی بوده و باید با احتیاط تفسیر شوند. برای ارائه توصیه‌های مدیریتی

مطمئن، نیاز به اجرای آزمون‌های گسترده‌تر با تکرارهای بیشتر، ارزیابی سال‌های متوالی و بررسی شاخص‌های فیزیولوژیک و اقتصادی وجود دارد. یافته‌های این پیش‌آزمون می‌تواند به‌عنوان راهنمای اولیه برای طراحی مطالعات آینده و بررسی استراتژی‌های بالقوه مدیریت محرک‌های رشد در تولید چغندر قند در مناطق خشک و نیمه‌خشک مورد استفاده قرار گیرد، ولی توصیه‌های عملی باید تنها پس از تأیید نتایج در مطالعات تکمیلی مطرح شوند.

عدم تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافع مالی یا غیرمالی در ارتباط با این پژوهش وجود ندارد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از مسئولان و کارکنان ایستگاه تحقیقاتی کمال شهر کرج به‌دلیل همکاری در اجرای این آزمایش صمیمانه قدردانی می‌نمایند.

References


1. Ampong, K., Thilakaranthna, M. S., and Gorim, L. Y. 2022. Understanding the role of humic acids on crop performance and soil health. *Frontiers in Agronomy*, 4, 848621. <https://doi.org/10.3389/fagro.2022.848621>.
2. Anjum, S. A., Xie, X. Y., Wang, L. C., Saleem, M. F., Man, C., and Lei, W. 2014. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African Journal of Agricultural Research*, 6, 2026–2032. <https://doi.org/10.5897/AJAR11.1674>.
3. AOAC. 2000. *Official methods of analysis of AOAC International* (17th ed.). Gaithersburg, MD: AOAC International.
4. Behzadian, M., Otaghsara, S. K., Yazdani, M., and Ignatius, J. 2012. A state-of-the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with Applications*, 39, 13051–13069. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.05.056>.
5. Bremner, J. M. 1960. Determination of nitrogen in soil by the Kjeldahl method. *Journal of Agricultural Science*, 55(1), 11–33. <https://doi.org/10.1017/S0021859600021579>
6. Bulgari, R., Franzoni, G., and Ferrante, A. 2019. Biostimulants application in horticultural crops under abiotic stress conditions. *Scientia Horticulturae*, 243, 359–369. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.08.054>.
7. Calvo, P., Nelson, L., and Kloepper, J. W. 2014. Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil*, 383, 3–41. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2131-8>.
8. Canellas, L. P., Olivares, F. L., Aguiar, N. O., Dias, M. C., and Jones, D. L. 2020. Biostimulants: Mechanisms and applications in plant nutrition and growth. *Scientia Horticulturae*, 270, 109408. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109408>.
9. Canellas, L. P., Olivares, F. L., Aguiar, N. O., Jones, D. L., Nebbioso, A., Mazzei, P., and Piccolo, A. 2015. Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture. *Scientia Horticulturae*, 196, 15–27. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.013>.
10. Chen, Q. 2022. Humic acid modulates growth, photosynthesis, hormone and osmolytes system of maize under drought conditions. *Agricultural Water Management*, 263, 107447. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107447>.
11. du Jardin, P. 2015. Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, 196, 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>.
12. Ebrahimian, E., Bybordi, A., and Seyed Sharifi, R. 2019. Effects of biostimulants on yield and quality of sugar beet under water deficit conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 42, 2263–2275. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1659314>.
13. El-Hassanin, A. A., Abdelhamid, M. T., and El-Nemr, M. A. 2016. Influence of humic acid application on growth, yield and water use efficiency of sugar beet under field conditions. *International Journal of Plant & Soil Science*, 11, 1–11. <https://doi.org/10.9734/IJPSS/2016/26147>.
14. FAO. 2013. *Manual on the use of atomic absorption spectrophotometry for soil and plant analysis*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
15. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2021. *FAOSTAT database on harvested area and production of sugar beet*. FAO. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QL>.
16. Gee, G. W., & Bauder, J. W. 1986. Particle-size analysis. In A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 1. Physical and mineralogical methods* (2nd ed., pp. 383–411). American Society of Agronomy.
17. Ghaffari, H., Rahimi, A., and Shirani Rad, A. H. 2022. Effects of drought stress on yield, quality and physiological traits of sugar beet. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 24, 789–802.
18. Heidari, M., Ghasemi, A., and Sharifi, R. 2017. Effect of amino acid application on yield and quality of sugar beet. *Iranian Journal of Agronomy Sciences*, 48, 215–227. (In Persian)
19. Hoffmann, C. M., Huijbregts, T., van Swaaij, N., and Jansen, R. 2020. Impact

- of drought stress on growth, yield and quality of sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *European Journal of Agronomy*, 120, 126140.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126140>.
20. Hwang, C.-L., & Yoon, K. 1981. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications a State-of-the-Art Survey*. Springer-Verlag.
 21. ICUMSA. 2011. *Methods Book: International methods of sugar analysis* (7th ed.). International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis.
 22. Kenter, C., Hoffmann, C. M., and Märlander, B. 2019. Effects of weather variables on sugar beet yield and quality parameters. *European Journal of Agronomy*, 103, 11–21.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.11.002>.
 23. Keskin, B., Akhoundnejad, Y., Dasgan, H. Y., and Gruda, N. S. 2025. Fulvic acid, amino acids, and vermicompost enhanced yield and improved nutrient profile of soilless iceberg lettuce. *Plants*, 14, 609.
<https://doi.org/10.3390/plants14040609>.
 24. Khan, N. A., Nazar, R., and Iqbal, N. 2012. Amino acids as regulators of plant responses to stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 50, 25–36.
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2011.09.010>.
 25. Khan, W., Prithviraj, B., and Smith, D. L. 2021. Biostimulants in crop production: Impacts on yield, quality and physiological responses under stress conditions. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40, 1234–1248.
<https://doi.org/10.1007/s00344-020-10123-7>.
 26. Kowalczyk, K., Zielony, T., and Gajewski, M. 2008. Effect of aminoplant and asahi on yield and quality of lettuce grown on rockwool. *Vegetable Crops Research Bulletin*, 69, 37–45.
 27. Lakhawat, S. S., Sharma, V., Singh, T., Patil, P., Priyadevi, S., and Gutam, S. 2024. Effects of pan evaporation-based drip irrigation levels on performance of guava grown in Udaipur and Rewa regions of India. *Journal of Agrometeorology*, 26, 69–73.
<https://doi.org/10.54386/jam.v26i1.2306>.
 28. Levitt, J. 1980. *Responses of plants to environmental stresses. Vol. 2: Water, radiation, salt, and other stresses*. New York: Academic Press.
 29. Lindsay, W. L., and Norvell, W. A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42, 421–428.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>.
 30. Loeppert, R. H., and Suarez, D. L. 1996. Carbonate and gypsum. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods* (pp. 437–474). Madison: SSSA and ASA.
 31. Mohammadi, A., Habibi, D., Vazan, S., and Mohammadi, S. 2018. Effect of amino acid application on yield and physiological traits of sugar beet under drought stress. *Iranian Journal of Agronomy Sciences*, 20, 145–158. (In Persian)
 32. Motaghi, S., and Nejad, T. S. 2014. The effect of different levels of humic acid on growth and yield of sugar beet. *International Journal of Biosciences*, 5, 61–68.
 33. Naderi, R., Schmidhalter, U., and Tavakol, E. 2002. Effects of humic substances on nutrient uptake and growth in sugar beet. *Journal of Plant Nutrition*, 25, 2291–2303.
<https://doi.org/10.1081/PLN-120014209>.
 34. Nardi, S., Pizzeghello, D., Muscolo, A., and Vianello, A. 2002. Physiological effects of humic substances on higher plants. *Soil Biology & Biochemistry*, 34, 1527–1536.
[https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00174-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00174-8).
 35. Nelson, D. W., and Sommers, L. E. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods* (pp. 961–1010). Madison: SSSA and ASA.
 36. Olsen, S. R., and Sommers, L. E. 1982. Phosphorus. In A. L. Page et al. (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 2: Chemical and Microbiological Properties* (pp. 403–430). Madison: ASA and SSSA.
 37. Rahimi, A., Madani, H., and Shirani Rad, A. H. 2019. Yield and quality response of sugar beet to biostimulants under limited irrigation. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 21, 1503–1515.
 38. Rahimi, A., Madani, H., and Shirani Rad, A. H. 2020. Effects of humic substances and biostimulants on growth, yield and quality of sugar beet under

- field conditions. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 22, 1123–1135.
39. Rašovský, M., Pulkrábek, J., Urban, J., and Zima, J. 2022. Effects of drought stress on sugar beet yield and technological quality. *Sugar Tech*, 24, 1123–1133.
<https://doi.org/10.1007/s12355-021-01051-6>.
40. Rhoades, J. D. 1982. Soluble salts. In A. L. Page (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 2: Chemical and Microbiological Properties* (pp. 167–179). Madison: ASA and SSSA.
41. Rose, M. T., Patti, A. F., Little, K. R., Brown, A. L., Jackson, W. R., and Cavagnaro, T. R. 2014. A meta-analysis and review of plant-growth response to humic substances: Practical implications for agriculture. *Advances in Agronomy*, 124, 37–89.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800138-7.00002-4>.
42. Roupheal, Y., and Colla, G. 2020. Biostimulants in agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 11, 40.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00040>.
43. Sadeghi, H., Khazaei, H. R., and Kafi, M. 2016. Effect of humic substances and amino acids on quantitative and qualitative traits of sugar beet. *Journal of Sugar Beet Research*, 53, 123–137. (In Persian)
44. Sparkes, D. 2017. Sugar beet. In *Encyclopedia of Applied Plant Sciences* (2nd ed.). Elsevier.
<https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/sugar-beet>
45. Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., and Loepfert, R. H. 1996. *Methods of soil analysis. Part 3: Chemical methods*. Madison, WI: Soil Science Society of America.
46. Taha, A. A., Ibrahim, M. A. M., and Abdelkhalek, A. A. 2011. Irrigation scheduling for pea using evaporation pan under drip irrigation at North Nile Delta region. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 2, 203–212.



Various aspects of analysis, interpretation and diagnosis of nutrient status using PCA, CND-clr and CND-ilr methods (a case study on sugar beet)

Abdolmohammad Daryashenas^{a*}, Karim Shahbazi^a , and Kambiz bazargan^a

^a Soil and Water Research Institute (SWRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

Article Info

Article Type

Research Article

Received

January 04, 2026

Revised

May 13, 2026

Accepted

May 16, 2026

Published online

June 17, 2026

Keywords

Mineral nutrition,
Nutrient balance,
Foliar analysis,
Sugar beet

*Corresponding author's email

amdaryashenas1335@gmail.com

Extended Abstract

Background and Objectives: Optimizing fertilizer use through plant analysis requires robust nutrient standards based on growth stage and a thorough understanding of nutrient interactions (the plant ionome). Statistical methods based on Compositional Data Analysis (CDA)—such as Principal Component Analysis (PCA) and Compositional Nutrient Diagnosis (CND)—overcome major limitations of single-factor approaches, provided they minimize bias in result interpretation. In this study, nutrient concentrations and root yield data from 170 sugar beet fields were compared using three models: PCA, CND-clr, and CND-ilr. This research aims to: (1) introduce the theoretical foundations of PCA, CND-clr, and CND-ilr; (2) validate nutrient indices through two interpretive approaches (minimum limit-maximum limit, LMi-LMa, and lower limit-upper limit, LL-LU) within the CND-clr model; (3) derive critical concentrations and sufficiency ranges using CND-clr indices; (4) validate CND-ilr reference standards and compare them with other models; and (5) assess nutrient status using PCA and compare it with CND-clr and CND-ilr.

Materials and Methods: Leaf concentrations of N, P, K, Fe, Mn, Zn, and Cu, along with root yield, were collected from 170 sugar beet farms in Khuzestan Province, southwestern Iran. Leaf samples were taken from plants aged 90–120 days, washed, oven-dried at 65 °C for 48 h, ground, and sieved. Nutrients were analyzed using standard laboratory methods: micro-Kjeldahl for N, spectrophotometry for P, flame photometry for K, and atomic absorption spectrophotometry for Fe, Mn, Zn, and Cu. At harvest, average root yield per hectare was recorded. The study area soils had a saturated extract pH of 7.5–7.8, salinity <1 dS m⁻¹, lime content of 30–50%, and silty loam to silty clay loam textures.

Results: Principal Component Analysis using absolute nutrient concentrations showed that four components explained approximately 85% of the total variance (eigenvalues > 1). In the first principal component (PC1), potassium, zinc, and copper exhibited the highest positive correlations, while nitrogen showed the highest negative correlation with root yield. However, interpreting nutrient status based on the nutrient index (IX) within the PCA framework led to bias. In contrast, the same nutrient index produced unbiased results when used with Pearson correlation. Consequently, PCA is capable of prioritizing nutrient–yield correlations at a macro scale (regional level) but lacks standard criteria for plot, farm, or orchard scale evaluation. Using the CND-clr method, critical concentrations and sufficiency ranges for N, P, K, Fe, Mn, Zn, and Cu were established. Validation of these standards on multiple farms using the two approaches revealed that the lower limit-upper limit (LL-LU) approach is more stringent than the minimum-maximum (LMi-LMa) approach. After determining CND-ilr reference standards, farm level validation effectively detected nutrient balances indicating synergistic and antagonistic effects, with the CND-ilr method providing the most diagnostically informative outputs.

Comparative analysis demonstrated that both CND-clr and CND-ilr, supported by credible reference standards, are capable of assessing plant nutritional status at both micro scale (individual field) and macro scale (regional) levels.

Conclusion: PCA is a valuable tool for macro scale prioritization of nutrient yield correlations, but its lack of micro scale evaluation standards limits its application at the farm level. By contrast, the CND-clr and CND-ilr methods, equipped with robust reference standards, effectively assess nutrient status across both spatial scales. Critical concentrations and sufficiency ranges for N, P, K, Fe, Mn, Zn, and Cu were determined as reference standards indicative of nutrient interactions. The LL-LU validation approach proved more stringent than LMi-LMa. Furthermore, the CND-ilr method enabled a more accurate diagnosis of synergistic and antagonistic nutrient interactions, making it particularly suitable for site-specific nutrient management.

Cite this article: Daryashenas, A.M., Shahbazi, K., Bazargan, K., 2026. Various aspects of analysis, interpretation and diagnosis of nutrient status using PCA, CND-clr and CND-ilr methods (a case study on sugar beet). Research Article, *Journal of Soil Research*, 40 (1), pp 81-104.



DOI: <https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.371888.808>

Publisher: Soil Science Society of Iran



نشریه پژوهش‌های خاک

(علوم خاک و آب)

<https://srjournal.arsoc.ir/>



جنبه‌های مختلف تحلیل، تفسیر و تشخیص وضعیت عناصر غذایی با روش‌های PCA، CND-clr و CND-ilr (مطالعه موردی چغندر قند)

عبدالمحمد دریاشناس^{۱*}، کریم شهبازی^۱  و کامبیز بازرگان^۱

^۱ مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

| اطلاعات مقاله | چکیده |
|--|---|
| <p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۴</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۲۳</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۶</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۲۷</p> <p>واژه‌های کلیدی تغذیه معدنی، تعادل عناصر غذایی، تشخیص برگی، چغندر قند</p> <p>* ایمیل نویسنده مسئول amdaryashenas1335@gmail.com</p> | <p>بهبود کردن مصرف کودها در مراحل مختلف رشد، متناسب با گونه‌های گیاهی و نیازهای تغذیه‌ای، نقش مؤثری در افزایش عملکرد محصولات و کاهش مصرف کود ایفا می‌کند. تحقق این هدف مستلزم وجود استانداردهای جامع مبتنی بر شناخت اثرات متقابل عناصر غذایی مورد نیاز گیاه است. در این پژوهش، داده‌های مربوط به غلظت عناصر غذایی و عملکرد ریشه در ۱۷۰ مزرعه چغندر قند واقع در شمال استان خوزستان استخراج و با استفاده از سه مدل PCA1، CND-clr2 و CND-ilr3 با پشتیبانی روش تحلیل داده‌های ترکیبی (CDA) مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. غلظت‌های بحرانی و محدوده بسندگی عناصر غذایی مشتق یافته از نرم‌های استاندارد CND-clr تعیین شد، سپس شاخص‌های عناصر غذایی با دو رویکرد حد پایین - حد بالا (LL-LU) و رویکرد حداقل - حداکثر ۵ (LMi-LMa)، در تعدادی از مزارع مورد مقایسه و اعتبار سنجی قرار گرفتند. همچنین با استفاده از نرم‌های استاندارد CND-ilr، تعدادی مزارع از نظر تشخیص تعادل‌های عناصر غذایی و اثرات سینرژیستی و آنتاگونیستی مورد ارزیابی و اعتبار سنجی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که روش PCA قادر به الویت‌بندی همبستگی بین عناصر غذایی و عملکرد ریشه چغندر قند است، ولی فاقد نرم‌های استاندارد برای ارزیابی در مقیاس خرد (کرت، مزرعه و باغ) است؛ بنابراین، روش PCA برای ارزیابی‌های کلان وضعیت عناصر غذایی یک منطقه‌ی کشاورزی با تعداد داده‌های بالا کاربرد دارد. نتایج مقایسه‌ها نشان داد که روش‌های CND-clr و CND-ilr، به دلیل داشتن نرم‌های استاندارد معتبر، توانایی ارزیابی وضعیت تغذیه گیاهان را در هر دو مقیاس خرد و کلان دارا است.</p> |

استناد: دریاشناس، ع، شهبازی، ک، بازرگان، ک، ۱۴۰۵. جنبه‌های مختلف تحلیل، تفسیر و تشخیص وضعیت عناصر غذایی با روش‌های PCA،

CND-clr و CND-ilr (مطالعه موردی چغندر قند) مقاله پژوهشی، نشریه پژوهش‌های خاک، (۱) ۴۰، ص ۸۱-۱۰۴.

DOI: <https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.371888.808>



مقدمه

زیادی بر طرف می‌کنند به شرطی که کمترین مقدار اریبی^۴ در تفسیر نتایج را داشته باشند؛ زیرا این اریبی‌ها موجب اشتباه در تشخیص می‌شوند (Pawlosky-Glahn Egozcue, 2008). برای پرهیز از این اشتباهات نیاز است که هدف و مقیاس ارزیابی وضعیت تغذیه گیاه را مد نظر داشت. مدل‌هایی مانند تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای تحلیل وضعیت عناصر غذایی در مقیاس کلان که با داشتن تعداد داده زیاد از طریق کاهش ابعاد^۵ استفاده می‌کنند، نتایج خوبی را برای تصمیم‌گیری و سیاست‌گذاری ارائه می‌دهند اما فاقد نرم‌های استاندارد برای ارزیابی در مقیاس خرد یعنی تعیین وضعیت تغذیه تا سطح و مقیاس یک کرت، مزرعه و باغ می‌باشند. درحالی‌که روش CND با توسل به نرم‌های استاندارد معتبر امکان ارزیابی در هر دو مقیاس کلان و خرد را داشته و علاوه بر آن ارزیابی در مقیاس کلان توسط روش CND از جمع ساده‌ی وضعیت تک تک مزارع بدست می‌آید که بیشتر به واقعیت نزدیک است و اعتبار بیشتری دارد. در روش CND-ilr که نسبت به CND-clr توسعه یافته‌تر است این امکان وجود دارد که سطح و مقیاس ارزیابی وضعیت تغذیه گیاهان برای بهینه کردن با لحاظ اثرات متقابل آنتاگونیستی و سینرژیستی به‌نحو دقیق‌تری بررسی گردد.

در این زمینه، Daryashenas و همکاران (۲۰۲۰) با کاربرد روش CND-ilr و طراحی ۸ تعادل متعامد دو تایی بدون همپوشانی و تلفیق آن با روش تعادل ترازویی^۶ توانستند ارزیابی دقیق‌تری را برای بهینه کردن مصرف کود در چغندر قند ارائه نمایند. به‌طور مشابه، Parent و همکاران (۲۰۱۲) با طراحی ۱۲ تعادل متعامد دو تایی بدون همپوشانی را با ۱۲ عنصر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن، منگنز، روی، مس، بر، گوگرد، کلسیم، منیزیم و کلر برای ۴۳۳ باغ کیوی نیوزلند منظور کردند و نهایتاً سه تعادل P|N و Cl|S و Cl, S |P, N را به عنوان اثرات متقابل مؤثر بر کاهش عملکرد درختان کیوی نیوزلند گزارش کردند. Tadayon و همکاران (۲۰۲۳) شاخص‌های عناصر غذایی مشتق شده از روش CND-clr را به‌عنوان متغیر مرتبط با عملکرد درختان انار با روش PCA ارزیابی کردند و نتیجه گرفتند که عناصر Ca, B, S و Mg به ترتیب بیشترین تأثیر را بر افزایش گروه عملکرد پایین داشتند. Zolfi Bavariani و همکاران، (۲۰۲۲) با استفاده از روش CND-clr وضعیت ۷۹ مزرعه گوجه فرنگی را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که تعداد مزارع با تعادل عناصر مطلوب‌تر در گروه عملکرد بالا بیشتر از تعداد مزارع با عملکرد پایین است که این نتایج نشان‌دهنده درستی فلسفه روش

در سال‌های اخیر با وارد شدن بخش خصوصی کشور در زمینه تولید و واردات انواع کودهای شیمیایی، آلی و زیستی اهمیت بهینه کردن مصرف کودها به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. هم‌اکنون بازار کود ایران سرشار از انواع ترکیبات کودی حاوی عناصر غذایی سریعاً محلول در آب، ترکیبات ضد تنش‌های محیطی و محرک‌های رشد آلی و بهبود دهنده‌های آلی خاک است که این مواد می‌توانند نقش قابل توجهی در بهینه کردن مصرف کود کشور داشته باشند. علاوه بر این، با تأسیس و توسعه‌ی آزمایشگاه‌های خصوصی امکان تجزیه دقیق و اعتبارسنجی این کودها نیز افزایش یافته است. بهینه کردن مصرف کودها در مراحل مختلف رشد با توجه به گونه-های گیاهی و نیاز مراحل مختلف رشد از طریق سرک‌دهی برگی و خاکی امکان‌پذیر است (Cheraghi et al., 2020; Khademi et al., 2001). بهینه کردن با توجه به نیاز مرحله رشد دو وجه اصلی دارد که یکی حداکثر کردن و دیگری حداقل کردن عناصر غذایی است. در گیاهانی مانند چغندر قند که کیفیت محصول اهمیت بسزایی دارد حداکثر کردن و حداقل کردن بدین طریق است که در مراحل اولیه رشد با حداکثر کردن مصرف کودها، به‌ویژه کودهای نیتروژنی، باید بیشترین سایه انداز ایجاد شود ولی در انتهای رشد (۶ تا ۱۰ هفته قبل از برداشت) باید مصرف کود به‌ویژه عنصر نیتروژن را به منظور جلوگیری از کاهش عیار قند و ناخالصی‌ها و نیتروژن مضر حداقل کرد. برای بهینه کردن کودها با استفاده از روش تجزیه گیاه نیاز به استانداردهای عناصر غذایی مبتنی بر نیاز مرحله‌ی رشد و شناخت اثرات متقابل عناصر است (Baxter et al., 2008; Parent et al., 2012).

استانداردهایی که بیانگر وضعیت عناصر غذایی می‌باشند، با استفاده از روش‌های غلظت بحرانی، حد کفایت، دریس و تشخیص چند گانه عناصر غذایی، برای گیاهان مختلف زراعی و باغی تعیین شده‌اند. Daryashenas and Sagafi. 2011; Basirat et al. 2025 (2016; Ghaderi et al. 2025). با این وجود، تفسیر صحیح نتایج حاصل از تجزیه گیاه، خاک و آب برای ارزیابی وضعیت تغذیه گیاه و توصیه‌های کودی حائز اهمیت است. روش‌های ارزیابی آماری مبتنی بر کاربرد (تحلیل داده‌های ترکیبی^۱ یا CDA) مانند روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی^۲ (PCA) و تشخیص چندگانه عناصر غذایی^۳ (CND) نارسایی‌های روش‌های تک عاملی را تا حدود

⁴ Bias

⁵ Dimensionality reduction technique

⁶ Pan balance

¹ Compositional Data Analysis

² Principal Component Analysis

³ Compositional Nutrient Diagnosis

استخراج با هضم خشک عصاره‌گیری و توسط دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد (Isaac et al., 2015).

خاک‌های مناطق تحت مطالعه، از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر نمونه‌برداری و تجزیه شد. به‌طور کلی، خاک این مناطق دارای pH گل اشباع حدود ۷/۲ تا ۷/۸، قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع کمتر از یک دسی زیمنس بر متر، میزان آهک در دامنه ۵۰-۳۰ درصد، بافت خاک سیلتی لوم تا سیلتی کلی لوم، میزان مواد آلی کمتر از ۰/۷ در صد، فسفر قابل جذب ۱۲-۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم، پتاسیم قابل جذب ۲۱۰-۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، آهن در محدوده ۳-۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم، منگنز ۴/۵-۳/۵، مس در محدوده ۰/۹-۰/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم و روی در حدود ۱/۱-۰/۹۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. در زمان برداشت میزان عملکرد ریشه در هر مزرعه نیز اندازه‌گیری شد.

روش تشخیص چند گانه عناصر غذایی (CND-clr)

در این مطالعه از مبانی ریاضی و آماری پیشنهادی توسط Parent و Dafir (۱۹۹۲) که بعداً توسط خیاری و همکاران (۲۰۰۱) توسعه یافته است، استفاده شد که به شرح زیر است.

۱- ترکیبات بافت گیاهی به صورت یک سادک^۱ (S^d) حاوی عناصر غذایی (N, P, K ...) و یک بخش باقیمانده عناصر (R_d) به‌شکل رابطه (۱) قابل بیان است که در آن d نماینده تعداد عناصر غذایی و R_d بیانگر باقیمانده عناصر است.

رابطه (۱)

$$S^d = [(N, P, K, \dots, R_d): N > 0, P > 0, K > 0 \dots R_d > 0 \quad N + P + K + \dots + R_d = 100]$$

در این رابطه عدد ۱۰۰ بیان کننده کل غلظت ماده خشک گیاه است (درصد) و N, P, K, ... R_d که نشان دهنده سایر عناصر غذایی باقیمانده و اندازه‌گیری نشده است که از رابطه (۲) محاسبه شد (Aitchison, 1986).

رابطه (۲)

$$R_d = 100 - (N + P + K \dots)$$

۲- میانگین هندسی عناصر غذایی با رابطه (۳) اندازه‌گیری شد.

رابطه (۳)

$$G = [N \times P \times K \times \dots \times R_d]^{1/d+1}$$

۳- نسبت لگاریتم طبیعی عناصر از طریق روابط (۴) به شرح زیر محاسبه شد.

رابطه (۴)

CND مبنی بر اینکه غلظت‌های موجود در گروه عملکرد بالا معیار خوبی برای ارزیابی وضعیت تعادل عناصر تغذیه گیاهان هستند، است.

با توجه به اهمیت موضوع تشخیص و تفسیر نتایج تجزیه برگی جهت استفاده در توصیه‌های کودی، مطالعه حاضر با هدف معرفی تئوری‌های حاکم بر روش شناسی ۳ مدل CND-clr و معرفی PCA و اعتبار سنجی نرم‌های استاندارد و شاخص‌های عناصر غذایی از طریق دو نوع رویکرد تفسیر و تشخیص وضعیت عناصر غذایی (رویکرد حداقل - حداکثر (LMi-LMa) و (رویکرد حد پایین - حد بالا (LL-LU) در مدل CND-clr در مزارع چغندر قند انجام شد. در این مطالعه همچنین، غلظت‌های بحرانی و محدوده ی بسندگی عناصر غذایی از طریق شاخص‌های عناصر غذایی CND-clr استخراج شد و با نرم‌های استانداردهای مرجع مدل CND-ilr در تعدادی از مزارع چغندر قند و نیز با سایر مدل‌ها مقایسه شد. در نهایت، ارزیابی وضعیت عناصر غذایی ۱۷۰ مزرعه چغندر قند با استفاده از مدل PCA و مقایسه آن با دو مدل CND-clr و CND-ilr انجام شد.

مواد و روش‌ها

داده‌ها و اطلاعات مورد استفاده

در این مطالعه از یک بانک اطلاعاتی، شامل غلظت مختلف عناصر غذایی برگ-نیترژن، فسفر، پتاسیم، آهن، منگنز، روی و مس- و همچنین عملکرد ریشه چغندر قند مربوط به ۱۷۰ مزرعه استفاده شد. محل نمونه‌برداری داده‌ها در استان خوزستان و از مزارع اطراف شهرستان‌های دزفول، شوش، اندیمشک و هفت‌تپه بود که از واحدهای کشت و صنعت، زارعین و کرت‌های آزمایشی، در مدت هفت سال متناوب (۱۳۷۹-۱۳۷۳)، استخراج شدند. نمونه‌های گیاهی از مزارعی که ۹۰ تا ۱۲۰ روز از تاریخ کاشت آنها گذشته بود و از بوته‌های بالغ کاملاً باز شده (بین جوان‌ترین برگ‌ها در مرکز بوته و برگ‌های مسن‌تر) تهیه شد. از ۳۰ نقطه واقع در هر مزرعه، ۳۰ بوته انتخاب و اندام‌های پهنک و دم‌برگ تفکیک و دو نمونه مرکب تهیه گردید. در این نمونه‌ها، نیترژن کل به روش میکروکلدال و با استفاده از دستگاه اتوآنالیزر کجلتک (Helrich, 1990)، فسفر به روش کالریمتری توسط اسپکتروفتومتر (Chapman & Pratt, 1978) و پتاسیم به وسیله دستگاه فلیم فتومتر (Hemke et al., 1996) اندازه‌گیری شد. عناصر روی، منگنز، آهن و مس نیز به روش

¹ Simplex

در چه آزادی $d+1$ تبعیت می‌کند (Ross, 1987). تبعیت متغیر شاخص توازن عناصر غذایی CND یعنی r^2 از تابع توزیع مربع کای یک مزیت به شمار می‌رود که در سامانه دریس امکان‌پذیر نبوده است.

۵- تمایز جامعه عملکرد به دو گروه زیاد و کم می‌تواند بر اساس ترسیم تابع تجمعی بین عملکرد و نسبت واریانس شاخص‌های عناصر غذایی باشد که مراحل محاسبه آن به طریق زیر انجام شد (Khiari et al. 2001).

(۱) عملکردها از زیاد به کم ردیف شدند؛

(۲) نسبت لگاریتمی (V_x) عناصر غذایی محاسبه گردید؛

(۳) واریانس مقادیر V_x برای اولین گروه عملکرد و برای سایر عملکردها محاسبه و نسبت واریانس آنها بر اساس رابطه زیر محاسبه شد. این عمل برای دومین گروه عملکرد و الی آخر به عمل آمد؛

رابطه (۸) واریانس V_x برای

$$F_i(V_x) = \frac{n_1 \text{ مشاهده}}{n_2 \text{ مشاهده}}$$

(۴) تابع تجمعی نسبت واریانس نیز به روش بند ۳ و بر

اساس رابطه (۹) محاسبه شد؛

رابطه (۹)

$$F_i^c = \frac{\sum_{i=1}^{n_1-1} f_i(V_x)}{\sum_{i=1}^{n-3} f_i(V_x)} \times 100$$

(۵) تابع تجمعی $F_i^c(V_x)$ مرتبط با عملکرد (Y) با الگوی

درجه ۳ قابل نمایش است؛

رابطه (۱۰)

$$F_i^c(V_x) = aY^3 + BY^2 + cy + d$$

(۶) نقطه عطف این منحنی که شکل کاوی دارد، از طریق

مشتق اول و دوم معادله محاسبه گردید؛

رابطه (۱۱)

$$\frac{\partial F_i^c(V_x)}{\partial Y} = 3ay^2 + 2by + c$$

$$Z_i = \log [x_i / g(x)]$$

$$V_N = \text{Ln}(N/G), V_P = \text{Ln}(P/G),$$

$$V_K = \text{Ln}(K/G) \dots V_{Rd} = \text{Ln}(R_d/G) \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$V_N + V_P + V_K + \dots + V_{Rd} = 0$$

بنابراین در این روابط، V_x بیانگر نسبت لگاریتمی عناصر برای x عنصر است. رابطه ۵ درستی محاسبات را تأیید می‌کند. بر اساس این تعریف، مجموع عناصر گیاهی بر مبنای عدد ۱۰۰ است و مجموع نسبت لگاریتمی عناصر با احتساب مقدار باقیمانده عناصر (R_d) برابر صفر خواهد بود. برای عناصری مانند N, P, K, \dots, R_d فرم بیانی از وضعیت و نسبت عناصر غذایی در گیاه است که مقادیر آن در جامعه با عملکرد زیاد بیانگر غلظت مطلوب و ایده آل است و به‌عنوان ارقام مرجع یا نرم‌های استاندارد CND محسوب شدند و به‌صورت $V_N^*, V_P^*, V_K^*, \dots, V_{Rd}^*$ معرفی شد. غلظت هر عنصر غذایی گیاه مورد مطالعه را با غلظت ایده آل یا همان نرم‌های CND استاندارد شد و بدین ترتیب شاخص‌های عناصر غذایی CND به دست آمد که برای عناصر N, P, K, \dots, R_d با استفاده از رابطه‌های ۶ محاسبه شد.

رابطه (۶)

$$I_N = (V_N - V_N^*) / SD_N^* \quad I_P = (V_P - V_P^*) / SD_P^* \quad I_K = (V_K - V_K^*) / SD_K^* \quad I_{Rd} = (V_{Rd} - V_{Rd}^*) / SD_{Rd}^*$$

در روابط مذکور $V_N^*, V_P^*, V_K^*, V_{Rd}^*, SD_N^*, SD_P^*, SD_K^*, SD_{Rd}^*$ به ترتیب میانگین و انحراف معیار نسبت لگاریتمی عناصر غذایی بودند که به‌عنوان نرم استاندارد و یا ارقام مرجع CND محسوب شدند. V_N, V_P, V_K, V_{Rd} نسبت لگاریتمی مربوط به نمونه مطالعاتی بود. I_N, I_P, I_K, I_{Rd} به ترتیب شاخص عناصر غذایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم و عناصر باقیمانده هستند.

۴- شاخص تعادل عناصر غذایی با روش CND از طریق رابطه

(۷) محاسبه شد. در این رابطه r^2 مجموع مربعات

شاخص‌های عناصر غذایی است و همیشه می‌تواند اعداد صفر

و بیشتر را به خود اختصاص دهد. از نظر تئوری هر اندازه r^2

به عدد صفر نزدیک‌تر شود، تعادل عناصر غذایی مطلوب‌تر

خواهد شد.

رابطه (۷)

$$r^2 = I_N^2 + I_P^2 + I_K^2 + \dots + I_{Rd}^2$$

بنابراین، برای هر نمونه مشخص گیاهی از طریق

به‌دست آوردن r^2 عدم توازن عناصر غذایی تعیین گردید. با توجه به

اینکه شاخص‌های عناصر غذایی CND متغیری مستقل و نرمال^۱

هستند، مجموع این شاخص‌ها یعنی r^2 از یک توزیع مربع کای با

^۱ Unit-Normal

نسبت لگاریتم ایزومتريک (ilr) و طراحی مقایسات دوتایی متوالی (تعادل‌های متعامد یا SBP)

ایده تفسیر نتایج برای نسبت‌های دو عنصری A/B (مانند روش دریس) و یا نسبت یک عنصر به چند عنصر (روش CND-clr) ممکن است برای بعضی از نسبت عناصر مناسب باشد ولی این روش‌ها، همیشه تعدادی از نسبت عناصر غذایی را به عنوان نرم مرجع نشان می‌دهند که نمایانگر شرایط تغذیه گیاه نیست و یک نرم اضافی از بیان تعادل عناصر غذایی است (Parent, 2011; Bergmann, 1988; Marschner, 2011). بنابراین، رویکرد نسبت عناصر که دارای D-1 درجه آزادی است به ایده تعادل‌های مستقل خطی^۴ برای D-1 جزء تبدیل گردید؛ که متقابلاً به جای تعداد $D \times (D-1) / 2$ جفت عناصر (مانند N/P و N/K و...) تعداد $D \times (D-1) / 2$ دوتایی متوالی از نسبت‌های آمیخته (Amalgamated) مانند N/ (P, K) و... با درجه آزادی D-1 جزء ممکن استخراج شد. بر این اساس، نسبت‌های لگاریتمی ایزومتريک (ilr) تهیه گردید. (Aitchison and Greenacre, 2002; Egozcue et al., 2003). به عبارت دیگر یک سادک متشکل از داده‌های ترکیبی را در یک فضای اقلیدسی به تعداد D-1 مقایسه لگاریتمی متعامد (Orthogonal log contrast) بدون هم‌پوشانی مقایسات انجام گرفت؛ که تحت عنوان تعادل‌های متعامد یا نسبت‌های ژئومتريک نیز گفته می‌شود؛ بنابراین یک سامانه مبتنی بر رویکرد تعادلی به شکل مقایسات دوتایی متوالی (SBP) طراحی شد. در واقع SBP یک ماتریس $(D-1) \times D$ مقایسات دوتایی متوالی است که یک جزء از یک مقایسه در صورت کسر^۵ با علامت +1 و یک جزء دیگر از مقایسه در مخرج کسر^۶ با علامت -1 مشخص گردید و برای یک مقایسه دوتایی متوالی (یک تعادل متعامد) به کار گرفته شد. در نتیجه مقدار ilr از طریق رابطه (۱۴) محاسبه شد (Modesto et al. 2014 and Egozcue et al., 2003).

رابطه (۱۴)

$$ilrj = \sqrt{\frac{n_j^+ n_j^-}{n_j^+ n_j^-}} \text{Log} \frac{g(c_j^+)}{g(c_j^-)}$$

n_j^+ و n_j^- : تعداد اجزاء تشکیل‌دهنده گروه صورت و مخرج کسر؛
 $g(c_j^+)$ و $g(c_j^-)$: میانگین هندسی اجزاء تشکیل‌دهنده گروه مثبت صورت (+1) و گروه منفی مخرج (-1)؛
 ilr: نسبت لگاریتمی ایزومتريک برای یک تعادل متعامد؛

رابطه (۱۲)

$$\frac{\partial^2 F_i^c(V_x)}{dY^2} = 6ay + 2b = 0$$

از حل معادله (۱۲) مقدار $-b/3a$ بیانگر عملکرد حد واسط بین گروه عملکرد کم و زیاد است که برای $d+1$ عنصر غذایی قابل محاسبه است.

روش تشخیص چند گانه عناصر غذایی (CND-ilr)

در روش CND ilr که نسبت به CND clr توسعه یافته‌تر است، این امکان وجود دارد که سطح و مقیاس ارزیابی وضعیت تغذیه گیاهان برای بهینه کردن با لحاظ اثرات متقابل آنتاگونیستی و سینرژیستی به نحو دقیق‌تری بررسی گردد.

فضای داده‌های ترکیبی^۱

یک بردار ترکیبی^۲ بسته شده بین یک مقدار معین^۳ مثلاً بین اعداد صفر تا ۱۰۰ درصد برای داده‌های تجزیه گیاه به شرح رابطه (۱۳) بیان شد (Parent, 2011; Aitchison and Greenacre, 2002; Egozcue et al., 2003).

$$S_D = C(c_1, c_2, \dots, c_D) \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$= \left(\frac{c_1 k}{\sum_{i=1}^D c_i}, \frac{c_2 k}{\sum_{i=1}^D c_i}, \dots, \frac{c_D k}{\sum_{i=1}^D c_i} \right)$$

که در آن (S_D) یک سادک و K واحد اندازه‌گیری (مثلاً درصد یا گرم در کیلوگرم یا قسمت در میلیون و...) و C_i برابر i امین قسمت از یک مجموعه ترکیبی با D قسمت است. در این رابطه مقدار باقیمانده عناصر از تفریق مقادیر اندازه‌گیری شده عناصر غذایی از عدد ۱۰۰ محاسبه گردید.

داده‌های ترکیبی که به فرم درصد و یا نسبت بیان می‌شوند و محصور بین یک محدوده ثابت هستند، معمولاً دارای توزیع نرمال نیستند اما داده‌هایی که مقادیر بین $-\infty$ تا $+\infty$ را اختیار می‌کنند می‌توانند توزیع نرمال داشته باشند و فاصله اطمینان کمتر از صفر و بالاتر از ۱۰۰ را بیان می‌کنند. لذا با تبدیل داده‌های نتایج تجزیه گیاه مثلاً تبدیل لگاریتمی، آنها را به توزیع نرمال و یا نزدیک به توزیع نرمال تبدیل گردید. (Parent, 2011; Rezaii, 1997).

⁴ linearly independent balance

⁵ group numerator

⁶ group denominator

¹ Compositional data space

² Compositional vector

³ Unit-sum constraint

پوشانی می‌توان ایجاد کرد که در این مطالعه برای ۷ عنصر N, P, K, Fe, Mn, Zn, Cu و باقیمانده عناصر Fv به شرح (جدول ۱) تعداد ۷ تعادل متعامد دوتایی شامل $ilr_1 : [P | N]$ و $[NP | K]$: ilr_2 و $[Fe | Mn]$: ilr_3 و $[Zn | CU]$: ilr_4 و $[Fe, Mn | Zn, Cu]$: ilr_5 و $[N, P, K | Mn, Zn, Fe, Cu]$: ilr_6 و $[Fv | N, P, K, Mn, Zn, Fe, Cu]$: ilr_7 برای چغندر قند پاییزه طراحی گردید.

در نتیجه تعادل به صورت { گروه +۱ | گروه -۱ } فرموله شد. برای مثال تعادل عنصر Fe در مقابل عناصر Cu, Zn, و Mn به صورت $[-Fe | (Mn, Zn, Cu)]$ برآورد گردید. بررسی اثر متقابل یک یا چند عنصر در مقابل سایر عناصر غذایی یک تعادل نامیده می‌شود. برای طراحی مقایسات دوتایی متوالی یا تعادل‌های متعامد، تعداد D-1 مقایسه لگاریتمی متعامد (Orthogonal log contrast) بدون هم

جدول ۱- طراحی تعادل‌های متعامد دوتایی متوالی هفت عنصر N, P, K, Fe, Mn, Zn و Cu و باقیمانده عناصر (FV) برای چغندر قند

Table 1. Design of sequential binary orthogonal balances (SBP) of seven elements N, P, K, Fe, Mn, Zn Cu and FV in sugar beet

| Ilr* | N | P | K | Fe | Mn | Zn | Cu | Fv | n _j ** | n _j *** | تعادل‌ها Balances |
|------------------|----|----|---|----|----|----|----|----|-------------------|--------------------|--------------------------------|
| ilr ₁ | 1 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | [P N] |
| ilr ₂ | -1 | -1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | [NP K] |
| ilr ₃ | 0 | 0 | 0 | -1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | [Fe Mn] |
| Ilr ₄ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | 1 | 0 | 1 | 1 | [Zn CU] |
| Ilr ₅ | 0 | 0 | 0 | -1 | -1 | 1 | 1 | 0 | 2 | 2 | [Fe, Mn Zn, Cu] |
| Ilr ₆ | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 0 | 4 | 3 | [N, P, K Mn, Zn, Fe, Cu] |
| Ilr ₇ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 7 | [Fv N, P, K, Mn, Zn, Fe, Cu] |

Ilr = نسبت لگاریتمی ایزومتریک، ** = تعداد علامت مثبت، *** = تعداد علامت منفی، Fv = سایر عناصر.

*Ilr = isometric log ratios; **: numbers of positive sign; ***: numbers of negative sign; Fv = fill value

ilr_i: نسبت لگاریتمی ایزومتریک برای یک نمونه مطالعاتی

*ilr_i: نسبت لگاریتمی ایزومتریک برای نمونه مرجع

رابطه (۱۷)

$$M = \sqrt{(ilr_i - ilr_i^*)^T COV^{-1} (ilr_i - ilr_i^*)}$$

M فاصله ماهالانویس و T ماتریس ترانهاده و COV^{-1} معکوس

ماتریس کوواریانس و ilr_i نسبت لگاریتمی ایزومتریک برای یک

نمونه مطالعاتی و * ilr_i نسبت لگاریتمی ایزومتریک برای نمونه

مرجع با توجه به مبانی دو مدل ذکر شده، استانداردهای مرجع ilr

CND و CND-clr (جدول ۲) و فاصله ماهالانویس مرجع (۴/۲)

که توسط تحقیقات قبلی برای چغندر قند تعیین شده بود در

ارزیابی‌های عناصر تغذیه‌ای برای تحقیق حاضر مورد استفاده

قرار گرفت.

فواصل اقلیدسی

شاخص فاصله ماهالانویس و شاخص فاصله ایچسن به-

عنوان تخمین‌گر تعادل عناصر غذایی استفاده شد. فاصله ایچسن

بطور ساده فقط با تبدیل لگاریتمی غلظت‌ها و نسبت‌های عناصر

غذایی محاسبه شد. ولی فاصله ماهالانویس با لحاظ ماتریس

کوواریانس تبدیل یافته لگاریتمی این تفاضل‌ها یعنی تفاوت بین

غلظت‌ها و یا نسبت‌های عناصر غذایی تبدیل یافته لگاریتمی نمونه-

های مطالعاتی نسبت به نمونه مرجع محاسبه گردید. رابطه‌های ۱۶

و ۱۷ به ترتیب بیان فاصله ایچسن و فاصله ماهالانویس می‌باشند.

رابطه (۱۶)

$$A = \sqrt{\sum_{i=1}^{D-1} (ilr_i - ilr_i^*)^2}$$

A: فاصله ایچسن

جدول ۲- استانداردهای مرجع عناصر غذایی CND-clr برای ۷ عنصر و استانداردهای مرجع عناصر غذایی CND-ilr برای ۷ تعادل برای چغندر قند پاییزه (دریاشناس و همکاران، ۱۳۹۹)

Table 2. CND-clr nutrient reference standards for 7 elements and CND-ilr nutrient reference standards for 7 blances (Ilr coordinate) in fall sugar beet (Daryashenas et al., 2020)

| متغیر عناصر Nutrient variate | میانگین Mean | انحراف معیار Standard division | متغیر عناصر Nutrient variate | میانگین Mean | انحراف معیار Standard division |
|---------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| | Clr variate استاندارد Clr | | | Ilr coordinate استاندارد Ilr | |
| N | 3.05 | 0.12 | ilr ₁ | 1.84 | 0.07 |
| P | 0.42 | 0.07 | ilr ₂ | 1.12 | 0.15 |
| K | 3.07 | 0.12 | ilr ₃ | -0.68 | 0.18 |
| Fe | -1.77 | 0.17 | Ilr ₄ | -0.48 | 0.13 |
| Mn | -2.72 | 0.15 | Ilr ₅ | -1.89 | 0.18 |
| Zn | -3.83 | 0.13 | Ilr ₆ | -7.04 | 0.11 |
| Cu | -4.50 | 0.14 | Ilr ₇ | -6.74 | 0.07 |

ilr = نسبت لگاریتمی ایزومتریک، Clr variate = استانداردهای مرجع روش CND-clr، Ilr coordinate = استانداردهای مرجع روش CND-ilr
ilr = isometric log ratio; Clr variate = It is reference norm for the centered log ratio method; Ilr coordinate = It is reference norm for the isometric log ratio method

تعیین بیشترین همبستگی‌ها و اولویت‌بندی تأثیر متغیرهای عناصر غذایی (N, P, K, Mn, Zn, Cu, Fe) بر عملکرد ریشه چغندر قند بود. معیار انتخاب (SC) از طریق رابطه $SC=0.5/\sqrt{\text{Eigenvalues}}$ برای ارزیابی همبستگی معنی‌دار بین عناصر و عملکرد ریشه در نظر گرفته شد.

محاسبات آماری

کلیه روابط و گراف‌های آماری مربوط به روش CND-clr و CND-ilr با استفاده از نرم‌افزار اکسل ۲۰۱۶ (Jakson, 2016) فرمول نویسی شد و کلیه محاسبات و گراف‌های روش PCA با نرم‌افزار مینی تب ۱۴ تهیه گردید.

نتایج و بحث

تحلیل، تفسیر، تشخیص و مقایسه وضعیت عناصر غذایی با هدف یافتن مناسب‌ترین روش ارزیابی و بهینه کردن تغذیه عناصر غذایی با کاربرد ۴ روش انجام شد: الف: روش کلاسیک CND-clr با استفاده از محدوده بسندگی حداقل- حداکثر شاخص عناصر غذایی ب: روش کلاسیک CND-clr با استفاده از محدوده بسندگی حد پایین - حد بالا شاخص عناصر غذایی ج: روش کلاسیک CND-ilr به منظور تشخیص دقیق‌تر اثرات سینرژیستی - آنتاگونیستی عناصر غذایی د: روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی. بدین منظور داده‌های گروه عملکرد کل مزارع (۱۷۰ مزرعه) و گروه عملکرد بالا (عملکردهای بیشتر از ۶۰ تن در

ارزیابی وضعیت عناصر غذایی با روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی

تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) تبدیلی در فضای برداری است که تحلیل مجموعه داده‌های بزرگ با تعداد زیادی بعد یا ویژگی، افزایش تفسیرپذیری داده‌ها با حفظ حداکثر مقدار اطلاعات و تجسم داده‌های چند بعدی را فراهم می‌کند. تحلیل مؤلفه‌های اصلی در واقع یک تکنیک آماری برای کاهش ابعاد یک مجموعه داده است. این کار با تبدیل خطی داده‌ها به یک سیستم مختصات جدید انجام می‌شود که (بیشتر) تغییرات در داده‌ها را می‌توان با ابعاد کمتری نسبت به داده‌های اولیه توصیف کرد. بسیاری از مطالعات از دو مؤلفه اصلی اول (PC1 و PC2) برای نمایش داده‌ها در دو بعد و شناسایی بصری خوشه‌های نقاط داده نزدیک به هم استفاده می‌کنند. اولین مؤلفه اساسی PC1 یک ترکیب خطی از پیش‌بینی‌های اصلی بود که بیشترین واریانس موجود در مجموعه داده‌ها را به خود اختصاص داد. این مؤلفه، جهت بیشترین تغییرات در داده‌ها را تعیین کرد. هیچ مؤلفه دیگری نمی‌تواند بیش از مؤلفه اساسی اول PC1 دامنه تغییرات داشته باشد. نتیجه محاسبه اولین مؤلفه اساسی، خطی بود که نزدیک‌ترین خط به داده‌ها را به خود اختصاص داد. در واقع این خط مجموع مربع فواصل را بین یک نقطه داده و خط، به کمینه مقدار می‌رساند. دومین مؤلفه اساسی PC2 نیز یک ترکیب خطی از پیش‌بینی‌های اصلی بود که واریانس باقی‌مانده در مجموعه داده را در خود حفظ کرد و با مقدار PC1 نا همبسته است. به عبارت دیگر، همبستگی بین مؤلفه اساسی اول و دوم صفر است (Greenacre et al. 2023). منظور از پیش‌بینی‌ها در مطالعه حاضر،

شاخص‌های عناصر استفاده شد. در ارتباط با روش حد پایین و حد بالا با توجه به اینکه رابطه شاخص‌های عناصر غذایی CND-clr با عملکرد رفتاری مشابه تابع کای اسکوئر دارد، امکان بیان این شاخص‌ها به صورت یک محدوده فراهم شد. در این روش، مقدار r^2 از حاصل جمع مربع شاخص‌های تمامی عناصر غذایی محاسبه شد. بر این اساس، مربع شاخص هر عنصر غذایی به صورت یک محدوده متقارن نسبت به صفر (symmetrical about zero) محاسبه گردید (Khiari et al. 2001). در واقع r^2 یک مجموعه متشکل از محدوده‌های شاخص عناصر غذایی است که هر کدام از شاخص‌های عناصر غذایی به صورت محدوده‌هایی از IX - تا IX + (حد پایین و حد بالا) قابل بیان شدند. شاخص عناصر غذایی که مقدار آنها در بین این محدوده قرار گرفت متعادل و خارج از آن نامتعادل (کمبود یا بیش بود) تفسیر شدند. محدوده‌های حد بالا و حد پایین با استفاده از روش رگرسیون استخراج شد (شکل ۱). نتایج نشان داد معادلات درجه ۲ برای روابط نیتروژن- عملکرد (عناصر پر مصرف) و عنصر روی- عملکرد (عناصر کم مصرف) در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($P \leq 0.05$) معنی‌دار شدند. سایر عناصر هم معنی‌دار شد (نتایج ارائه نشده است). در این اشکال، بیشترین عملکرد در محدوده + و - عدد ۰/۹۹ تا حدود ۱ مشاهده شد و برای عنصر روی، در محدوده + و - عدد ۰/۷۵ محاسبه گردید (جدول ۳ و شکل ۱)

هکتار) و گروه عملکرد پایین (عملکرد های کمتر از ۶۰ تن در هکتار) با استفاده از ۴ رویکرد فوق مورد تجزیه تحلیل قرار گرفت.

ارزیابی وضعیت عناصر غذایی با روش کلاسیک CND-clr با استفاده از

محدوده بسندگی حداقل- حداکثر (LMi-LMa) و

محدوده بسندگی حد پایین - حد بالا (LL-LU)

ابتدا داده‌های عملکرد ریشه و غلظت عناصر N, P, K, Mn, Zn, Cu, Fe مزرعه چغندر قند با استفاده از تابع تجمعی نسبت عناصر غذایی و معیار قرار دادن ۶۰ تن در هکتار (Cut-off yield) برای عملکرد ریشه حد واسط، به دو گروه عملکرد بالاتر و پایین‌تر از ۶۰ تن در هکتار تفکیک شد و استانداردهای مرجع (CND-clr) با استفاده از محاسبات روش‌شناسی مذکور استخراج گردید (جدول ۲ و ۳). ارزیابی تغذیه‌ای برای هر کدام از عناصر برای کلیه مزارع چغندر قند با استفاده از این استانداردها، می‌تواند انجام گیرد. علاوه بر استانداردهای مرجع (CND-clr) پارامترهای حداقل - حداکثر (LMi-LMa) و حد پایین - حد بالا (LL-LU) شاخص‌های عناصر غذایی (IX) برای عناصر N, P, K, Mn, Zn, Cu, Fe تعیین گردید (جدول ۳). روش کلاسیک CND-clr با استفاده از محدوده بسندگی حد پایین و حد بالا (LL-LU)

جدول ۳ - استانداردهای مرجع CND-clr مشتق شده از جامعه عملکرد بالای ۶۰ تن در هکتار (۳۴ مزرعه) و ارزیابی وضعیت عناصر غذایی با دو رویکرد (LMi-LMa) و (LL-LU)

Table 3. CND-clr standards derived from the high yield population more than 60 t h⁻¹ (34 fields) and assessing the nutrient status using two approaches (LMi-LMa) and (LL-LU)

| استاندارد مرجع | N | P | K | Mn | Zn | Fe | Cu | |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------|
| CND-clr-Standards | | | | | | | | |
| Mean - (میانگین) | 3.05 | 0.42 | 3.06 | -2.73 | -3.83 | -1.77 | -4.50 | |
| SD - (انحراف معیار) | 0.12 | 0.07 | 0.12 | 0.15 | 0.13 | 0.17 | 0.14 | |
| parameters) پارامترها | IN | IP | IK | IMn | IZn | IFe | Icu | CND-r ² |
| حداکثر (LMa) | 2.14 | 3.11 | 1.91 | 2.91 | 1.28 | 2.33 | 1.57 | 31.03 |
| حداقل (LMi) | -1.46 | -2.83 | -2.46 | -1.55 | -3.74 | -1.82 | -2.75 | 1.42 |
| SD IX - (انحراف معیار) | 0.95 | 0.99 | 0.96 | 0.96 | 0.95 | 0.99 | 0.99 | 7.21 |
| حد بالا (LU) | +0.99 | +0.99 | +0.99 | +0.99 | +0.74 | +0.99 | +0.99 | |
| حد پایین (LL) | -0.99 | -0.99 | -0.99 | -0.99 | -0.74 | -0.99 | -0.99 | |
| SD IX - (انحراف معیار) | 0.45 | 0.43 | 0.51 | 0.59 | 0.56 | 0.73 | 0.54 | |

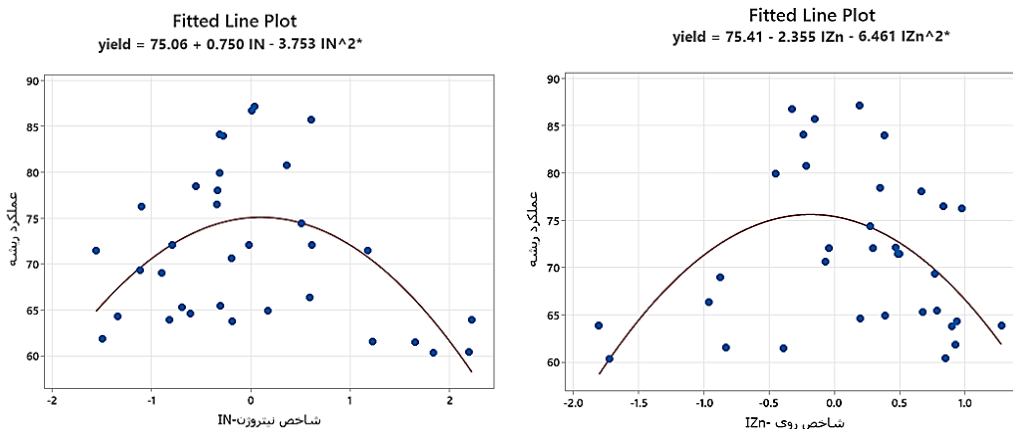
SD = انحراف معیار، LMa = محدوده حداکثر شاخص عنصر، LMi = محدوده حداقل شاخص عنصر، SD IX = انحراف معیار از میانگین شاخص‌های عناصر غذایی، LU = حد بالا، LL = حد پایین شاخص عنصر، CND-r² = شاخص تعادل عناصر غذایی که از جمع مربع شاخص‌های عناصر از طریق رابطه ($r^2 = I_N^2 + I_P^2 + I_K^2 + \dots + I_{Rd}^2$) محاسبه شد. محدوده حد پایین - حد بالا به روش رگرسیون محاسبه شد.

SD=standard deviation; LMa= maximum limit; LMi= minimum limit; SD IX= standard deviation from the mean; LU = upper limit; LL= lower limit; CND- r². The CND nutrient imbalance index of a diagnosed specimen is its CND r² and is computed as follows: $r^2 = I_N^2 + I_P^2 + I_K^2 + \dots + I_{Rd}^2$. The upper and lower bounds were extracted using the regression method (Figure 1).

بالا بیشتر بود، نامتعادل بیش بود و اگر از مقدار حداقل یا حد پایین کمتر بود، نامتعادل کمبود تفسیر شدند. در ادامه، وضعیت چهار مزرعه از گروه عملکرد کمتر از ۶۰ تن در هکتار انتخاب و با استفاده از دو محدوده شاخص عناصر غذایی شامل محدوده پایین - بالا و دیگری محدوده حداقل - حداکثر مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. این چهار مزرعه از مزارع ۶۰ تن در هکتار به پایین با کاهش فاصله حدود ۱۰ تن به‌طور تصادفی از بانک اطلاعاتی انتخاب گردید. بررسی و تحلیل این ۴ مزرعه نشان داد که در هر چهار مزرعه تعداد نتایج متعادل در روش حداقل - حداکثر بیشتر از روش محدوده پایین - بالا بود که نشان می‌دهد روش محدوده پایین - بالا برای نشان دادن مزارع متعادل سخت‌گیرانه‌تر است (جدول ۴ و ۵ و ۶ و ۷). در روش حداقل - حداکثر ۱۹ مرتبه متعادل در برابر ۷ مرتبه نامتعادل برای روش محدوده پایین - بالا مشاهده شد. همچنین، ۵ مرتبه نامتعادل بیش‌بود در روش حداقل - حداکثر در برابر ۱۳ مرتبه نامتعادل بیش‌بود برای روش محدوده پایین - بالا و ۴ مرتبه نامتعادل کمبود در روش حداقل - حداکثر در برابر ۸ مرتبه نامتعادل کمبود برای روش محدوده پایین - بالا مشاهده شد (جدول ۴ مزرعه A و جدول ۵ مزرعه B و جدول ۶ مزرعه C و جدول ۷ مزرعه D).

در هر دو روش فوق‌الذکر استانداردهای مرجع -CND-clr یکسان است و تفاوت آنها در نحوه استفاده از غلظت‌های محدوده بسندگی و به تبع آن شاخص عناصر غذایی (IX: IN, IP, IK, IMn, IZn, IFe, ICu) است که در یکی محدوده حداقل - حداکثر و دیگری محدوده پایین - بالا شاخص عناصر غذایی در محاسبه و تحلیل و تفسیر نتایج استفاده شد (Rozane et al. 2020; (Khiari et al. 2001). Rozane و همکاران (۲۰۲۰) حد بحرانی و محدوده بسندگی برای انگور را با استفاده از استانداردهای مرجع -CND-clr و با منظور نمودن محدوده حداقل - حداکثر بجای محدوده پایین - بالا ارزیابی کردند. در مطالعه حاضر نیز، ابتدا استانداردهای مرجع -CND-clr برای ۱۷۰ مزرعه با استفاده از روش شناسی گام به گام استخراج شده از روش تشخیص چند گانه عناصر غذایی -CND-clr تعیین گردید (جدول ۳).

پارامترهای مرجع مانند محدوده حداقل - حداکثر و محدوده حد پایین - حد بالا برای شاخص‌های عناصر غذایی (IK, IN, IP, IMn, IZn, ICu, IFe) محاسبه شد (جدول ۳). از این پارامترها برای ارزیابی وضعیت عناصر غذایی بدین گونه استفاده گردید که اگر شاخص هر عنصری بین محدوده حداقل و حداکثر و یا بین محدوده حد پایین و حد بالا قرار گرفت، متعادل، اگر از مقدار حداکثر و یا حد



شکل ۱- تعیین محدوده‌های حد بالا و حد پایین (LL-LU) شاخص عناصر غذایی با استفاده از روش رگرسیون برای عناصر پر مصرف (نیترژن) و کم مصرف (روی)

Figure 1. Determining of upper and lower limit (LL-LU) ranges nutrient indices using regression for macro (N) and micro nutrients (Zn)

جدول ۴- ارزیابی و مقایسه وضعیت عناصر غذایی با کاربرد مدل CND-clr از طریق ۲ روش محدوده‌های بسندگی حداقل- حداکثر و حد پایین - حد بالا شاخص عناصر غذایی (عملکرد ریشه ۵۲/۶۱۱ تن در هکتار) - مزرعه A

Table 4. Assessment and comparison of nutrient status using the CND-clr model through 2 methods of LMi-LMa and LL-LU nutrient indices (root yield 52.611 t h⁻¹) – field A

| شاخص عناصر غذایی Nutrient index (IX) | IN | IP | IK | IMn | IZn | IFe | ICu |
|---|-------------------------------|-------------|--------------------------|-------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|
| روش حد پایین - حد بالا LL-LU method | نا متعادل بیشبود Imb.-H | متعادل B | نا متعادل کمبود Imb.D | متعادل B | نا متعادل کمبود Imb.D | نا متعادل بیشبود Imb.-H | نا متعادل کمبود Imb.D |
| روش حداقل- حداکثر LMi-LMa method | متعادل B | متعادل B | نا متعادل کمبود Imb.D | متعادل B | متعادل B | نا متعادل بیشبود Imb.-H | متعادل B |
| غلظت عناصر غذایی Concentration of nutrients g kg ⁻¹ | 39.8 | 2.5 | 25 | 0.116 | 0.026 | 0.410 | 0.014 |
| مقدار شاخص عناصر غذایی Nutrient Index value (IX) | 1.47 | 0.47 | -2.51 | 0.72 | -2.98 | 2.50 | -1.68 |

B= balance; Imb. - H = imbalance high; Imb.D = imbalance deficiency; LMa = maximum limit; LMi = minimum limit; LU = upper limit; LL = lower limit

جدول ۵- ارزیابی و مقایسه وضعیت عناصر غذایی با کاربرد مدل CND-clr از طریق ۲ روش محدوده‌های بسندگی حداقل- حداکثر و حد پایین - حد بالا شاخص عناصر غذایی (عملکرد ریشه ۴۹/۱۲ تن در هکتار) - مزرعه B

Table 5. Assessment and comparison of nutrient status using the CND-clr model through 2 methods of LMi-LMa and LL-LU nutrient indices (root yield 49.12 t h⁻¹) – field B

| شاخص عناصر غذایی Nutrient index (IX) | IN | IP | IK | IMn | IZn | IFe | ICu |
|---|--------------------------------|--------------------------------|-------------|--------------------------------|----------------------------|-------------|-------------|
| روش حد پایین - حد بالا LL-LU method | نا متعادل بیشبود Imb.- H | نا متعادل بیشبود Imb.- H | متعادل B | نا متعادل بیشبود Imb.- H | نا متعادل کمبود Imb.- D | متعادل B | متعادل B |
| روش حداقل- حداکثر LMi-LMa method | متعادل B | متعادل B | متعادل B | متعادل B | نا متعادل کمبود Imb.- D | متعادل B | متعادل B |
| غلظت عناصر غذایی Concentration of nutrients g kg ⁻¹ | 41.4 | 2.6 | 30 | 0.130 | 0.023 | 0.269 | 0.015 |
| مقدار شاخص عناصر غذایی Nutrient Index value (IX) | 1.86 | 1.03 | -0.88 | 1.55 | -3.98 | 0.02 | -0.94 |

B= balance; Imb. - H = imbalance high; Imb.D = imbalance deficiency; LMa = maximum limit; LMi = minimum limit; LU= upper limit; LL = lower limit

جدول ۶- ارزیابی و مقایسه وضعیت عناصر غذایی با کاربرد مدل CND-clr از طریق ۲ روش محدوده‌های بسندگی حداقل- حداکثر و حد پایین - حد بالا شاخص عناصر غذایی (عملکرد ریشه ۴۱/۹۲۰ تن در هکتار)- مزرعه C

Table 6. Assessment and comparison of nutrient status using the CND-clr model through 2 methods of LMi-LMa and LL-LU nutrient indices (root yield 41.920 t h⁻¹) – field C

| شاخص عناصر غذایی Nutrient index (IX) | IN | IP | IK | IMn | IZn | IFe | ICu |
|---|---------------------|---------------------|--------|--------------------|--------|---------------------|--------------------|
| روش حد پایین- حد بالا | نا متعادل بیشبود | نا متعادل بیشبود | متعادل | نا متعادل کمبود | متعادل | نا متعادل بیشبود | نا متعادل کمبود |
| LL- LU method | Imb.- H | Imb.- H | B | Imb. D | B | Imb.- H | Imb. D |
| روش حداقل- حداکثر | متعادل | متعادل | متعادل | نا متعادل کمبود | متعادل | متعادل | متعادل |
| LMi-LMa method | B | B | B | Imb. D | B | B | B |
| غلظت عناصر غذایی Concentration of nutrients g kg ⁻¹ | 39.6 | 2.9 | 32 | 0.072 | 0.039 | 0.390 | 0.015 |
| مقدار شاخص عناصر غذایی Nutrient Index value (IX) | 1.1 | 1.91 | -0.79 | -2.72 | 0.72 | 1.90 | -1.7 |

B= balance; Imb. - H = imbalance high; Imb.D = imbalance deficiency; LMa = maximum limit; LMi = minimum limit; LU = upper limit; LL = lower limit

جدول ۷- ارزیابی و مقایسه وضعیت عناصر غذایی با کاربرد مدل CND-clr از طریق ۲ روش محدوده‌های بسندگی حداقل- حداکثر و حد پایین - حد بالا شاخص عناصر غذایی (عملکرد ریشه ۳۸/۵۱۸ تن در هکتار)- مزرعه D

Table 7. Assessment and comparison of nutrient status using the CND-clr model through 2 methods of LMi-LMa and LL-LU nutrient indices (root yield 38.518 t h⁻¹) – field D

| شاخص عناصر غذایی Nutrient index (IX) | IN | IP | IK | IMn | IZn | IFe | ICu |
|---|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| روش حد پایین- حد بالا LL-LU method | نا متعادل بیشبود Imb. - H | نا متعادل بیشبود Imb. - H | نا متعادل کمبود Imb. D | نا متعادل بیشبود Imb. - H | نا متعادل کمبود Imb. D | بیشبود نا متعادل Imb. - H | بیشبود نا متعادل Imb. - H |
| روش حداقل- حداکثر LMi-LMa method | نا متعادل بیشبود Imb. - H | نا متعادل بیشبود Imb. - H | متعادل B | متعادل B | نا متعادل کمبود Imb. D | نا متعادل بیشبود Imb. - H | نا متعادل بیشبود Imb. - H |
| غلظت عناصر غذایی Concentration of nutrients g kg ⁻¹ | 44.9 | 3.10 | 25.9 | 0.112 | 0.005 | 0.442 | 0.021 |
| مقدار شاخص عناصر غذایی Nutrient Index value (IX) | 3.50 | 4.93 | -1.26 | 1.30 | -19.40 | 3.65 | 2.12 |

B= balance; Imb. - H = imbalance high; Imb.D = imbalance deficiency; LMa = maximum limit; LMi = minimum limit; LU = upper limit; LL = lower limit

بین دو پارامتر مذکور، غلظت‌های بحرانی و محدوده بسندگی عناصر پر مصرف و کم مصرف استخراج شد (جدول ۸). غلظت‌های بحرانی برای همه عناصر با صفر قرار دادن معادلات رگرسیونی مذکور استخراج شد. همچنین مقادیر محدوده‌های بسندگی از حاصل جمع غلظت‌های بحرانی به اضافه و منهای دو سوم انحراف معیار (2/3SD) محاسبه گردید (Melo et al., 2018). این غلظت‌ها جامع و بیانگر اثرات متقابل عناصر غذایی برای چغندر قند می‌باشند. با استفاده از این غلظت‌ها می‌توان ارزیابی جامعی مبتنی بر لحاظ اثرات متقابل عناصر غذایی را برای مزارع مختلف چغندر قند انجام داد. همچنین رابطه همبستگی منفی بین عملکرد ریشه و مجموع مربعات شاخص‌های عناصر غذایی (r²) در سطح ۹۹ درصد (P≤0.01)** معنی‌دار شد (جدول ۸). نتیجه اخیر دلالتی است بر اثبات این نظریه که هر چه میزان r² کمتر و به طرف صفر میل کند احتمالاً تعادل مناسب‌تری بین عناصر غذایی ایجاد شده و به تبع آن عملکرد افزایش خواهد یافت (Khiari et al., 2001).

استخراج غلظت‌های بحرانی و محدوده بسندگی عناصر غذایی از طریق شاخص‌های عناصر غذایی CND-clr

غلظت‌های بحرانی و یا محدوده بسندگی عناصر غذایی برای گیاهان زراعی که از آزمایش‌های تک عاملی^۱ مشتق شده‌اند، فاقد اثرات متقابل عناصر غذایی هستند. در حالیکه، اگر از آزمایش‌های چندعاملی نظیر CND استخراج شوند جامعیت بیشتری داشته و بیانگر اثرات متقابل عناصر غذایی خواهند بود (Rozane et al., 2020) (Khiari et al., 2001; al., 2020). Rozane و همکاران (2020) با استفاده از رتباط رگرسیونی بین دو پارامتر، شامل شاخص‌های عناصر غذایی (IX) که توسط روش تحلیل داده‌های ترکیبی (CDA) پشتیبانی شدند و دیگری غلظت مطلق عناصر غذایی (X)، توانستند غلظت‌های بحرانی و محدوده بسندگی عناصر پر مصرف و کم مصرف را از داده‌های تعریف‌شده در محیط CND برای انگور استخراج کنند. در مطالعه حاضر نیز با استفاده از روابط رگرسیونی

¹ Univariate

جدول ۸ - مدل‌های آماری برای تعیین سطوح بحرانی و حدود بسندگی عناصر غذایی از طریق شاخص‌های عناصر غذایی CND-clr
Table 8. Statistical models for determining critical level and sufficiency range through CND-clr nutrient indices

| عناصر Nutrients | معادلات همبستگی Statistical models | ضریب تبیین (R ²) | غلظت بحرانی Critical level ⁽¹⁾ | محدوده بسندگی Sufficiency range ⁽²⁾ |
|--------------------|---|---------------------------------|--|---|
| N | IN=0.3060N-11.298** | 0.84 | 36.8 g kg ⁻¹ | 34-39 g kg ⁻¹ |
| P | IP=3.5545P-9.4582** | 0.48 | 2.66 g kg ⁻¹ | 2.54-2.76 g kg ⁻¹ |
| K | IK=0.172 K-6.4782** | 0.89 | 37.6 g kg ⁻¹ | 36-38 g kg ⁻¹ |
| Mn | IMn=55.34Mn- 6.3297 ** | 0.84 | 115 mg kg ⁻¹ | 104-126 mg kg ⁻¹ |
| Zn | IZn=162.71Zn-6.2268** | 0.92 | 38 mg kg ⁻¹ | 34-42 mg kg ⁻¹ |
| Fe | IFe=15.593Fe-4.6941۴** | 0.88 | 301 mg kg ⁻¹ | 262-340 mg kg ⁻¹ |
| Cu | ICu= 296.96Cu-5.8118۵** | 0.90 | 19 mg kg ⁻¹ | 17-21mg kg ⁻¹ |
| Root yield | CND-r ² = 7.47-0.09110 yield** | (R ² =0.3125) | - | - |

۱ و ۲= به ترتیب غلظت‌های بحرانی برای همه عناصر با صفر قرار دادن معادلات رگرسیونی و محدوده بسندگی هر عنصر با اضافه و منهای کردن ۲/۳ انحراف معیار به غلظت بحرانی تعیین گردید، ** معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد.

(**) Significance at 1%

⁽¹⁾ Critical level (CL) values or appropriate concentrations drawn by assigning the null value to the indices of the equations applied to each nutrient

⁽²⁾ The sufficiency range for each element was determined by adding or subtracting 2/3 standard deviations from the critical concentration.

ارزیابی وضعیت عناصر غذایی با روش کلاسیک CND- ilr به منظور تشخیص دقیق‌تر اثرات سینرژیستی - آنتاگونیستی عناصر غذایی

همان‌گونه که در بخش مربوط به روش CND-ilr تشریح شد، این امکان وجود دارد که اثرات متقابل عناصر بر تغییرات رشد و عملکرد با طراحی هفت اثر متقابل عناصر پرمصرف و کم مصرف (به عبارت دیگر، هفت تعادل عناصر) و با بکارگیری نسبت لگاریتم ایزومتریک (ilr) مندرج در (جدول ۱)، با دقت بیشتری ارزیابی شود. بر این اساس همان چهار مزرعه‌ای که با روش CND-clr ارزیابی شده بودند، مجدداً با روش CND-ilr و با در نظر گرفتن فاصله ماهالانویس مرجع برابر با ۴/۲ محاسبه و بررسی شد. بدین منظور، برای هر مزرعه اختلاف بین ilr محاسبه شده و مقدار استاندارد مرجع ilr* یعنی (ilr-ilr*) برای هر تعادل عناصر غذایی محاسبه شد. تعادل‌هایی که بیشترین عدد چه علامت مثبت و یا منفی را به خود اختصاص دهند بیشترین نقش را در نامتعادلی عناصر غذایی خواهند داشت. با تغییر مقدار عناصر مربوطه در تعادل (کاهش یا افزایش)، مقدار فاصله ماهالانویس متعادل شده برآورد گردید. کلیه محاسبات در (جدول ۹) ارائه شد و تحلیل نتایج در ادامه آورده شده است.

جدول ۹- ارزیابی و مقایسه وضعیت عناصر غذایی با کاربرد مدل CND-ilr با طراحی ۷ تعادل عناصر غذایی برای ۴ مزرعه عملکرد پایین

Table 9. Assessment and comparison of nutrient status using the CND-ilr model through 7 nutrient balance designs for 4 low-yield population fields (named A, B, C, D).

| عملکرد ریشه/ root yield | [P N] ilr ₁ -ilr ₁ * | [NP K] Ilr ₂ -ilr ₂ * | [Fe Mn] Ilr ₃ -ilr ₃ * | [Zn CU] Ilr ₄ -ilr ₄ * | [Fe, Mn] Zn, Cu] Ilr ₅ -ilr ₅ * | [N,P,K Mn,Zn,Fe,Cu] Ilr ₆ -ilr ₆ * | [Fv N, P, K, Mn, Zn, Fe, Cu] Ilr ₇ -ilr ₇ * | فاصله ماهانوبیس Mahalanobis distance | فاصله ماهانوبیس متعادل شده Balanced Mahalanobis distance | |
|-------------------------------|---|---|---|---|---|---|--|---|---|------|
| مزرعه A Field-A | 52.611 | 0.114 | -0.373 | -0.240 | 0.046 | -0.545 | 0.034 | -0.112 | 5.38 | 3.4 |
| مزرعه B Field-B | 49.128 | 0.11 | -0.25 | 0.14 | 0.19 | -0.40 | -0.19 | -0.11 | 4.74 | 2.6 |
| مزرعه C Field-C | 41.920 | 0.005 | -0.23 | -0.54 | -0.22 | -0.06 | -0.16 | 0.063 | 4.62 | 3.8 |
| مزرعه D Field-D | 38.518 | 0.05 | -0.48 | -0.31 | -1.5 | -1.24 | -0.55 | -0.235 | 27.6 | 5.77 |

ilr = نسبت‌های لگاریتمی ایزومتریک - نمونه مزرعه، ilr* = نسبت‌های لگاریتمی ایزومتریک - استاندارد عناصر غذایی، Fv = سایر عناصر

ilr = isometric log ratios - farm sample; ilr* = isometric log ratios - nutrient standard; Fv = fill value

مقدار مرجع (۴/۲) بود که بیانگر نامتعادلی عناصر غذایی است؛ اما کدامیک از ۷ تعادل نقش بیشتری در این نامتعادلی را ایفا کرده است. نتایج جدول ۹ نشان داد که تعادل $ilr_3: Fe:Mn$ با اختصاص عدد ۵۴/۰- بیشترین نقش را در نامتعادلی عناصر غذایی ایفا کرده است. غلظت آهن و منگنز برگ به ترتیب ۲۹۰ و ۷۲ میلی‌گرم در کیلوگرم بود در حالیکه مقدار مطلوب غلظت این دو عنصر برای حداکثر عملکرد به ترتیب ۳۴۰ - ۲۶۲ و ۱۲۶-۱۰۴ میلی‌گرم در کیلوگرم است (جدول ۸). حال اگر غلظت ۱۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم منگنز را جایگذاری کنیم یا به عبارت دیگر از جنبه عملی کود دهی منگنز را افزایش دهیم، مقدار فاصله ماهالانویس $ilr_3: Fe:Mn$ ۴/۶۲ به ۳/۸ کاهش یافته و بهبود تعادل عناصر غذایی و در نتیجه افزایش احتمالی عملکرد قابل انتظار خواهد بود.

مزرعه D: تحلیل داده‌های مزرعه D با عملکرد $38/518$ تن در هکتار (جدول ۹) نشان داد که شاخص‌های فاصله ماهالانویس این مزرعه برابر $27/6$ بود که بیانگر نامتعادلی زیادی است. بررسی دقیق‌تر نشان داد که غلظت عنصر روی تنها ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم است و پیش‌بینی شد علت این نامتعادلی شدید مربوط به کمبود شدید عنصر روی باشد. نتایج جدول ۹ نشان داد که تعادل $ilr_4: Zn:Cu$ با اختصاص عدد $1/5$ - بیشترین نقش را در نامتعادلی عناصر غذایی ایفا کرده است با جایگزینی غلظت روی به مقدار ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم در معادله (به عبارتی، افزایش قابل‌توجه کود دهی عنصر روی)، فاصله ماهالانویس به $4/77$ کاهش یافت و یک تعادل عنصری مناسب به دست آمد. این یافته‌ها نشان داد که تنش شدید روی Zn باعث نامتعادلی عناصر و کاهش شدید رشد و عملکرد این مزرعه شده است.

ارزیابی وضعیت عناصر غذایی با روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)

ارزیابی وضعیت عناصر غذایی با روش PCA برای داده‌های مطالعه حاضر، از دو جنبه مورد بررسی قرار گرفت. در جنبه نخست، کل جامعه مورد مطالعه شامل عملکرد بالا و پایین (۱۷۰ مزرعه) بررسی شد. در این مرحله، هدف مقایسه نتایج ارزیابی عناصر غذایی در دو حالت بود: (۱) استفاده از مقادیر غلظت مطلق عناصر غذایی (X) و (۲) به‌کارگیری شاخص‌های عناصر غذایی (IX) استخراج شده از روش CND-clr (جدول ۱۰). در جنبه دوم، ارزیابی وضعیت عناصر غذایی با روش PCA برای گروه عملکرد پایین (گروه با عملکرد کمتر از ۶۰ تن در هکتار) انجام شد. هدف از بررسی اخیر،

مزرعه A: تحلیل داده‌های مزرعه با عملکرد $52/611$ تن در هکتار نشان داد شاخص‌های فاصله ماهالانویس محاسبه شده مزرعه A برابر با $5/38$ شد که نسبت به مقدار فاصله ماهالانویس مرجع $4/2$ بیشتر بود که بیانگر عدم تعادل عناصر غذایی بود؛ اما پرسش اصلی این بود که کدامیک از ۷ تعادل نقش بیشتری را در این نامتعادلی ایفا کرده است. بررسی نتایج مندرج در جدول ۹ نشان داد که تعادل $ilr_5: [Fe,Mn|Zn,Cu]$ با اختصاص عدد $545/0$ - بیشترین نقش را در نامتعادلی عناصر غذایی ایجاد کرده بود. غلظت آهن و روی برگ در این مزرعه به ترتیب 410 و 26 میلی‌گرم در کیلوگرم بود و محدوده مطلوب غلظت این دو عنصر برای حداکثر عملکرد به ترتیب $340 - 262$ و $42 - 34$ میلی‌گرم در کیلوگرم بود (جدول ۸). حال اگر برای آهن غلظت 310 میلی‌گرم در کیلوگرم را جایگذاری کنیم یا به عبارت دیگر از جنبه عملی کود دهی آهن را کاهش دهیم (اگر کود دهی آهن انجام شده باشد) مقدار شاخص ماهالانویس از $5/38$ به $4/35$ کاهش می‌یابد که نزدیک حد بحرانی $4/2$ است و متعاقب آن اگر عنصر روی را از 26 به 30 میلی‌گرم در کیلوگرم افزایش دهیم (به عبارت دیگر کود دهی روی را افزایش دهیم) عدد شاخص ماهالانویس به $3/4$ کاهش یافته و وضعیت عناصر این مزرعه در منطقه تعادل قرار خواهد گرفت و به تبع آن انتظار عملکرد بیشتری خواهیم داشت.

مزرعه B: در مزرعه با عملکرد $49/128$ تن در هکتار مقدار شاخص فاصله ماهالانویس $4/74$ محاسبه شد (جدول ۹) که از فاصله ماهالانویس مرجع (۴/۲) کمی بیشتر بود و بیانگر نامتعادلی عناصر غذایی در این مزرعه بود. در جدول ۹ با بررسی هفت تعادل مربوط به این مزرعه، تعادل $ilr_3: [Fe,Mn|Zn,Cu]$ بیشترین فاصله بین نمونه این مزرعه با نمونه مرجع نشان داد که مقدار آن برابر با $0/4$ - بود. در این مزرعه مقدار عنصر روی 23 میلی‌گرم در کیلوگرم بود که از مقدار بهینه روی ($42-34$ میلی‌گرم به کیلوگرم، جدول ۸) فاصله دارد. حال اگر در معادله محاسبه فاصله ماهالانویس مقدار عنصر روی را از 23 به 30 میلی‌گرم در کیلوگرم افزایش و جایگزین کنیم (به عبارتی دیگر کود دهی روی را افزایش دهیم)، مقدار فاصله ماهالانویس از $4/74$ به $2/6$ کاهش یافت و تعادل عناصر برقرار شد و انتظار افزایش عملکرد بیشتری خواهیم داشت. این یک ویژگی منحصر به فردی است که با استفاده از رویکرد نسبت لگاریتم ایزومتریک (ilr) با تغییر فقط یک عنصر می‌توان به یک تعادل بسیار مناسبی دست یافت (Parent, 2011).

مزرعه C: تحلیل داده‌های مزرعه با عملکرد $41/920$ تن در هکتار نشان داد که شاخص فاصله ماهالانویس $4/62$ (جدول ۹) بیشتر از

همبستگی بین عملکرد و متغیر بیان کننده وضعیت عناصر غذایی را به صورت مثبت یا منفی محاسبه می‌کند.

در این ارتباط Khiari و همکاران (۲۰۰۱) برای ذرت و Daryashenas و Saghafi (۲۰۱۱) برای چغندر قند نشان دادند که همبستگی بین عملکرد با شاخص عنصر غذایی نیتروژن (IN) از یک معادله درجه چهار پیروی می‌کند، به طوری که بیشترین عملکرد در مناطقی که IN به طرف صفر میل می‌کند حاصل می‌شود. در مطالعه حاضر نیز، برآزش داده‌های عملکرد ریشه در مقابل شاخص نیتروژن (IN) در شکل (۳)، این موضوع را تأیید می‌کند، به گونه‌ای که عملکردهای بالا در نقطه متمایل به صفر تجمع یافته‌اند. همچنین، مقایسه نتایج ارزیابی وضعیت عناصر غذایی با شاخص عناصر غذایی (IX) در جدول (۱۰)، با نتایج همبستگی‌های پیرسون ارائه شده در جدول (۱۱)، روندی متضاد را نشان می‌دهد؛ بنابراین استفاده از شاخص عناصر غذایی (IX) به عنوان متغیر در روش PCA موجب تفسیر غلط می‌شود. به عبارت دیگر، تفسیر همبستگی‌ها در مدل PCA با استفاده از شاخص عناصر غذایی (IX) موجب اریبی شد که باعث استنتاج غلط می‌شود. یک تابع اریب بدین معنی است که مقدار واقعی تغییرات با مقادیر محاسبه شده (امید ریاضی) منطبق نباشد. با انتخاب مدل‌های اختصاصی ad hoc، می‌توان فرم‌های بیانی از عناصر غذایی را انتخاب کرد که با واقعیت اثرات متقابل عناصر منطبق بوده و توسط دانش تغذیه گیاه و محققین عرصه کشاورزی و اکولوژی طی تجربه‌های چندین ساله تأیید شده مورد توجه و ملاک قرار گرفته است (Parent, 2011; Pawlosky-Glahn; Egozcue, 2008). ولی با اختصاص غلظت مطلق عناصر غذایی به عنوان متغیر (X) تفسیر نا اریب (Unbias) می‌شود؛ بطوریکه وضعیت عناصر غذایی با غلظت مطلق عناصر غذایی به عنوان متغیر (X) (جدول ۱۰) با نتایج همبستگی‌های پیرسون در جدول (۱۲) روند مشابه نشان داد؛ بنابراین، در روش PCA استفاده از شاخص غلظت مطلق عناصر غذایی به عنوان متغیر (X) نسبت به عملکرد، تصویر روشن‌تری را در مقایسه با کاربرد شاخص عناصر غذایی (IX) نسبت به عملکرد نشان داد.

شناخت عناصر غذایی مؤثر در کاهش یا افزایش عملکرد ریشه در این گروه بود (جدول ۱۳).

ارزیابی وضعیت عناصر غذایی کل ۱۷۰ مزرعه مرتبط با عملکرد ریشه چغندر قند به روش PCA با لحاظ غلظت مطلق عناصر غذایی (X) و شاخص عناصر غذایی (IX): CND-clr

کل داده‌های مربوط به ۱۷۰ مزرعه با استفاده از روش PCA برای ارزیابی وضعیت عناصر غذایی پر مصرف و کم مصرف، با لحاظ نمودن غلظت مطلق عناصر غذایی به عنوان متغیر (X) نسبت به عملکرد ریشه، انجام شد. این نتایج نشان داد که در مجموع حدود ۸۵ درصد واریانس تغییرات داده‌ها ($Eigenvalues > 1$) توسط چهار مؤلفه اصلی تبیین شد (جدول ۱۰ و شکل ۲). تفسیر نتایج جدول ۱۰ و شکل ۲ نشان داد که در مؤلفه اصلی اول (PC1)، عناصر پتاسیم و روی و مس به ترتیب بیشترین همبستگی مثبت و عنصر نیتروژن بیشترین همبستگی منفی را با عملکرد ریشه به خود اختصاص دادند. تأثیر مثبت پتاسیم و تأثیر منفی نیتروژن و همچنین عدم تعادل این دو عنصر بر عملکرد ریشه چغندر قند در منطقه شمال خوزستان قبلاً نیز گزارش شده است (Daryashenas et al., 2020). در مؤلفه اصلی دوم (PC2)، فسفر بیشترین همبستگی مثبت و منگنز بیشترین همبستگی منفی را با عملکرد ریشه نشان داد. در مؤلفه اصلی سوم (PC3)، آهن بیشترین همبستگی منفی و در مؤلفه اصلی چهارم (PC4)، منگنز بیشترین همبستگی مثبت را با عملکرد ریشه داشت. این همبستگی‌ها همچنین با در نظر گرفتن شاخص عناصر غذایی (IX) به عنوان متغیر در جدول ۱۰ و شکل ۲ ارائه شده‌اند؛ اما تحلیل و تفسیر وضعیت عناصر غذایی بر اساس شاخص عناصر غذایی (IX) دارای یک تناقض اساسی بین عملکرد و وضعیت عناصر غذایی را نشان داد؛ زیرا بر اساس تئوری حاکم بر روش CND-clr، بیشترین همبستگی مثبت بین عملکرد ریشه و وضعیت تغذیه عناصر زمانی حاصل می‌شود که شاخص‌های عناصر غذایی به سمت صفر میل کنند ($r^2=0$)، در حالی که روش PCA

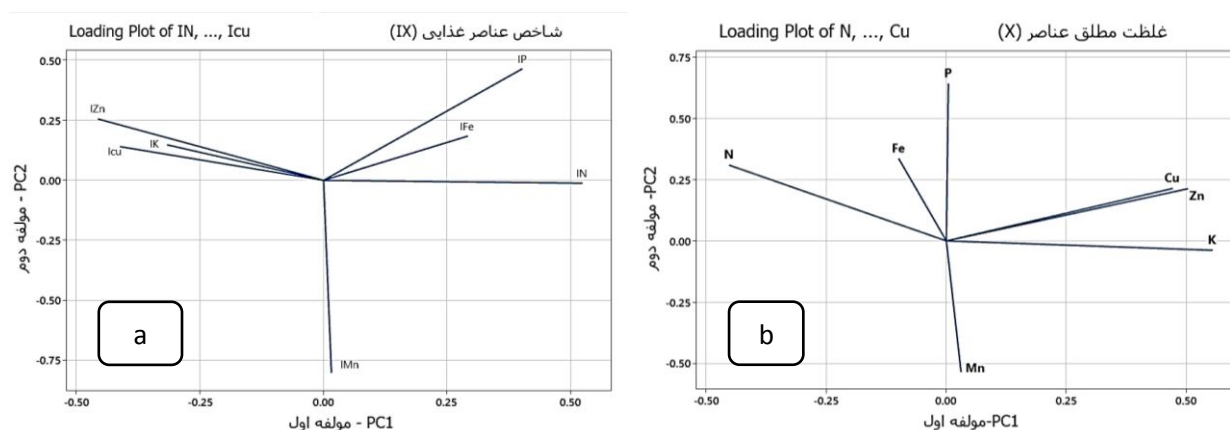
جدول ۱۰- ارزیابی وضعیت عناصر غذایی کل ۱۷۰ مزرعه به روش PCA با در نظر گرفتن شاخص عناصر غذایی (IX) : CND-clr و غلظت مطلق عناصر غذایی (X) نسبت به عملکرد ریشه

Table 7. Evaluation of the nutrient status of all 170 fields using the PCA method, considering nutrient index (IX) and absolute nutrient concentration (X) in relation to root yield.

| متغیر (IX) | PC1 | PC2 | PC3 | PC4 | متغیر (X) | PC1 | PC2 | PC3 | PC4 |
|---|---------------|---------------|---------------|---------------|---|---------------|---------------|---------------|--------------|
| IN | 0.524* | -0.012 | 0.304 | -0.299 | N | -0.453 | 0.309 | 0.234 | 0.487 |
| IP | 0.402 | 0.464 | 0.341 | -0.135 | P | 0.004 | 0.642 | 0.124 | 0.022 |
| IK | -0.317 | 0.148 | 0.527 | 0.606 | K | 0.555 | -0.038 | 0.004 | -0.291 |
| IMn | 0.016 | -0.802 | 0.091 | -0.015 | Mn | 0.031 | -0.535 | -0.280 | 0.598 |
| IZn | -0.457 | 0.256 | -0.059 | -0.089 | Zn | 0.504 | 0.213 | 0.036 | 0.229 |
| IFe | 0.292 | 0.184 | -0.700 | 0.366 | Fe | -0.099 | 0.336 | -0.922 | -0.044 |
| ICu | -0.412 | 0.140 | -0.113 | -0.619 | Cu | 0.472 | 0.214 | 0.005 | 0.516 |
| Eigenvalues مقادیر ویژه | 2.5933 | 1.4919 | 1.2292 | 0.8085 | Eigenvalues مقادیر ویژه | 2.4313 | 1.8413 | 0.8932 | 0.7863 |
| Explained variance(%) توزیع واریانس | 0.370 | 0.213 | 0.176 | 0.116 | Explained variance (%) توزیع واریانس | 0.347 | 0.263 | 0.128 | 0.112 |
| Accumulated variance (%) تجمع واریانس | 0.370 | 0.584 | 0.759 | 0.875 | Accumulated variance (%) تجمع واریانس | 0.347 | 0.610 | 0.738 | 0.850 |
| Selection criterion(SC) معیار انتخاب | 0.31 | 0.409 | 0.45 | 0.556 | Selection criterion(SC) معیار انتخاب | 0.32 | 0.368 | 0.529 | 0.563 |

*مقادیری که با رنگ تیره مشخص شده اند نشاندهنده ارتباط معنی‌دار بین شاخص عناصر غذایی (IX) و غلظت مطلق عناصر (X) با عملکرد ریشه هستند که بوسیله رابطه $(SC=0.5/\sqrt{\text{Eigenvalues}})$ محاسبه شد. IN تا ICu شاخص عناصر غذایی هستند.

*Values in boldface are dominant in the PC loadings by setting the level of significance defined according to the selection criterion $(SC=0.5/\sqrt{\text{Eigenvalues}})$. According to the SC, the boldface coefficients in the table are considered dominant in the PC loadings. This means that the traits associated with these coefficients are significantly related to the respective principal components. IN until ICu are nutrient indices



شکل ۲- تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) به منظور تشخیص میزان اثر گذاری عناصر بر عملکرد ریشه ۱۷۰ مزرعه چغندر قند (a): غلظت مطلق عناصر غذایی (X)، اولین مؤلفه (PC1) و دومین مؤلفه (PC2) به ترتیب با اختصاص ۳۴/۷ و ۲۶/۳ درصد واریانس‌ها و (b) شاخص عناصر غذایی (IX)، اولین مؤلفه (PC1) و دومین مؤلفه (PC2) به ترتیب با اختصاص ۳۷ و ۲۱/۳ درصد واریانس‌ها

Figure 2. Principal component analysis (PCA) to determine the effect of nutrients on root yield -170 sugar beet fields (a): Absolute nutrient concentration (X), the first component (PC1) and the second component (PC2), respectively, 34.7 and 26.3 percent of the variances (b): Nutrients index (IX), the first component (PC1) and the second component (PC2), respectively, 37 and 21.3 percent of the variances.

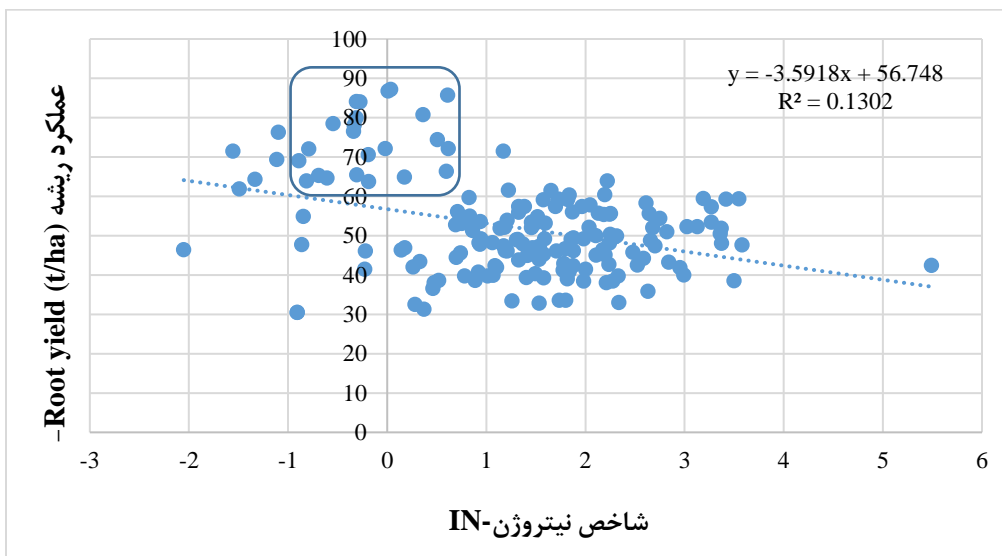
جدول ۱۱- ضریب همبستگی پیرسون (r) بین شاخص‌های عناصر غذایی (IX) نسبت به هم و نسبت به عملکرد ریشه چغندر قند (۱۷۰ مزرعه)

Table 8. Pearson correlation coefficient (r) between nutrient indices (IX) relative to each other and relative to sugar beet root yield (170 fields)

| IX | Root yield عملکرد ریشه | IN | IP | IK | IMn | IZn | IFe |
|-----|---------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| IN | -0.361** | | | | | | |
| IP | -0.305** | 0.600** | | | | | |
| IK | 0.339** | -0.383** | -0.092 | | | | |
| IMn | 0.028 | 0.026 | -0.446** | -0.155* | | | |
| IZn | 0.294** | -0.564** | -0.330** | 0.203** | -0.320** | | |
| IFe | -0.426** | 0.035 | 0.099 | -0.438** | -0.294** | -0.328** | |
| ICu | 0.486** | -0.496** | -0.304** | 0.108 | -0.199** | 0.328** | -0.299** |

* معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، ** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، IN تا ICu شاخص عناصر غذایی هستند

* Significance at 5%; ** Significance at 1%; IN until ICu are nutrient indice



شکل ۳- برازش عملکرد ریشه در مقابل شاخص غذایی نیتروژن (IN)

Figure 3. Root yield versus nitrogen nutrient index (IN)

نشان داد (**0.456 و 0.555) و نیتروژن در هر دو روش همبستگی منفی معنی‌دار را با عملکرد ریشه نشان دادند (**0.317- و -0.453). همچنین عناصر روی و مس در هر دو روش همبستگی مثبتی با عملکرد نشان دادند. در روش پیرسون، همبستگی فسفر با عملکرد در سطح ۹۵ درصد معنی‌دار شد، در حالی که فسفر در مؤلفه اصلی اول (PC1) معنی‌دار نشد ولی در مؤلفه اصلی دوم (PC2) معنی‌دار شد. آهن در روش پیرسون دارای همبستگی منفی معنی‌دار با عملکرد بود و در PCA نیز در مؤلفه اصلی سوم همبستگی منفی

تفسیر همبستگی‌های عناصر غذایی به روش پیرسون

در مقایسه با روش PCA

همبستگی عناصر غذایی با عملکرد ریشه چغندر قند برای ۱۷۰ مزرعه به روش همبستگی پیرسون در (جدول ۱۲) انجام شد. مقایسه داده‌های این جدول با نتایج مندرج در جدول ۱۰ (شاخص غلظت مطلق عناصر غذایی (X) در ستون مؤلفه اول PC1)، نشان داد در هر دو روش الگویی تقریباً مشابه دارند. بطوریکه در هر دو روش، عنصر پتاسیم بیشترین همبستگی مثبت معنی‌دار را با عملکرد

عنصری مطلوب‌تر و در نتیجه افزایش عملکرد منجر شود. این نتیجه با یافته‌های حاصل از روش تعادل ترازویی (Pan balance) برای همین ۱۷۰ مزرعه چغندر قند (Daryashenas et al. 2020).

معنی‌دار نشان داد؛ به عبارتی در هر دو معنی‌دار شدند. تحلیل مجموعه این مقایسه‌ها نشان داد که می‌توان با اطمینان بیشتری نتیجه گرفت پتاسیم مهم‌ترین عنصر مؤثر در افزایش عملکرد ریشه چغندر است، در حالیکه نیتروژن نقش کاهشی داشته است؛ به عبارت دیگر، کاهش نیتروژن و افزایش پتاسیم می‌تواند به ایجاد تعادل

جدول ۱۲- ضریب همبستگی پیرسون (r) بین عناصر غذایی برگ نسبت به هم و نسبت به عملکرد ریشه چغندر قند (۱۷۰ مزرعه)

Table 12. Pearson correlation coefficient (r) between leaf nutrients relative to each other and relative to root yield of sugar beet (170 fields)

| | عملکرد ریشه Root yield | N | P | K | Mn | Zn | Fe |
|----|---------------------------|----------|----------|----------|---------|---------|-------|
| N | -0.317** | | | | | | |
| P | -0.154* | 0.341** | | | | | |
| K | 0.456** | -0.654** | 0.026 | | | | |
| Mn | 0.055 | -0.179 | -0.497** | -0.104 | | | |
| Zn | 0.291** | -0.327** | 0.184 | -0.149** | -0.104 | | |
| Fe | -0.337** | 0.111 | 0.260** | -0.014 | -0.149* | -0.017 | |
| Cu | 0.491** | -0.223** | 0.200** | -0.104** | -0.014 | 0.614** | 0.001 |

* = معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، ** = معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد.

* Significance at 5% ** Significance at 1%

ارزیابی وضعیت عناصر غذایی گروه عملکرد پایین به روش PCA با لحاظ روش غلظت مطلق عناصر غذایی (X) نسبت به عملکرد ریشه

گروه مزارع با عملکرد پایین با استفاده از روش PCA برای تعیین وضعیت عناصر غذایی پر مصرف و کم مصرف با لحاظ غلظت مطلق عناصر غذایی به عنوان متغیر X نسبت به عملکرد ریشه ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که در مجموع، حدود ۶۸/۴ درصد از واریانس تغییرات داده‌ها ($Eigenvalues > 1$) با اختصاص ۳ مؤلفه تبیین گردید (جدول ۱۳ و شکل ۴). تفسیر نتایج (جدول ۱۳) و (شکل ۴) نشان داد که در مؤلفه اصلی اول (PC1)، عناصر فسفر و مس و روی به ترتیب بیشترین همبستگی مثبت و عنصر منگنز بیشترین همبستگی منفی را با عملکرد ریشه به خود اختصاص دادند. در مؤلفه اصلی دوم (PC2)، عنصر نیتروژن بیشترین همبستگی منفی و پتاسیم بیشترین همبستگی مثبت را با عملکرد ریشه نشان داد. در مؤلفه اصلی سوم (PC3) نیز، منگنز بیشترین همبستگی منفی با عملکرد ریشه را نشان داد.

جدول ۱۳- ارزیابی وضعیت عناصر غذایی گروه عملکرد پایین به روش PCA با لحاظ غلظت مطلق عناصر غذایی (X)

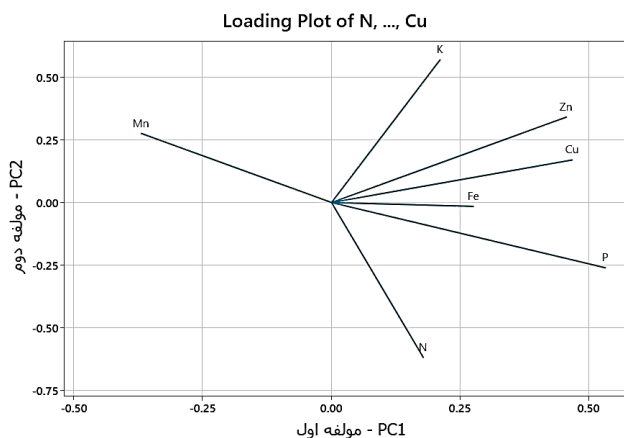
Table 13. Assessment of nutrient status of low-yield population fields using PCA method considering absolute nutrient concentration (X)

| متغیر (X) | PC1 | PC2 | PC3 |
|--------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| N | 0.179 | -0.620 | -0.340 |
| P | 0.532* | -0.261 | 0.207 |
| K | 0.211 | 0.571 | 0.333 |
| Mn | -0.370 | 0.276 | -0.589 |
| Zn | 0.457 | 0.341 | -0.260 |
| Fe | 0.276 | 0.341 | 0.134 |
| Cu | 0.468 | 0.170 | -0.547 |
| Eigenvalues ¹ | 2.1364 | 1.6229 | 1.0304 |
| Explained variance(%) ² | 0.305 | 0.232 | 0.147 |
| Accumulated variance(%) ³ | 0.305 | 0.537 | 0.684 |
| Selection criterion(SC) ⁴ | 0.342 | 0.392 | 0.492 |

1: مقادیر ویژه، 2: توزیع واریانس، 3: تجمع واریانس، 4: معیار انتخاب * مقادیری که با رنگ تیره مشخص شده اند نشان‌دهنده سطح معنی‌دار بین غلظت مطلق عناصر غذایی (X) و عملکرد ریشه هستند که بوسیله رابطه $(SC=0.5/\sqrt{\text{Eigenvalues}})$ محاسبه شد.

*Values in boldface are dominant in the PC loadings by setting the level of significance defined.

according to the selection criterion $(SC=0.5/\sqrt{\text{Eigenvalues}})$. According to the SC, the boldface coefficients in the table are considered dominant in the PC loadings. This means that the traits associated with these coefficients are significantly related to the respective principal components.



شکل ۴- تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) به منظور تشخیص میزان اثر گذاری عناصر بر عملکرد ریشه ۱۳۶ مزرعه چغندر قند (گروه عملکرد پایین) با در نظر گرفتن غلظت‌های مطلق عناصر (X)، اولین مؤلفه (PC1) و دومین مؤلفه (PC2) به ترتیب با اختصاص ۳۰/۵ و ۲۳/۲ درصد واریانس‌ها

Figure 4. Principal component analysis (PCA) to determine the effect of nutrients on root yield of 136 sugar beet fields (low yield population) considering "absolute nutrient concentration" (X), first component (PC1) and second component (PC2) with 30.5 and 23.2 percent of variances, respectively.

ارزیابی وضعیت عناصر غذایی در هر دو مقیاس خرد و کلان را دارا می‌باشند. غلظت بحرانی و محدوده بسندگی برای عناصر N، P، K، Fe، Mn، Zn، Cu به‌عنوان استانداردهای مرجع بیانگر اثرات متقابل تعیین گردید. با استفاده از استانداردهای مرجع CND-clr تعدادی از مزارع با دو رویکرد حد پایین- حد بالا (LL- LU) و حداقل- حداکثر (LMi-LMa)، مقایسه و اعتبار سنجی شدند. نتایج نشان داد رویکرد حد پایین- حد بالا سخت‌گیرانه‌تر بود. همچنین با استفاده از روش CND-ilor تشخیص دقیق‌تر اثرات سینرژیستی - آنتاگونیستی

نتیجه‌گیری

در این پژوهش مزایا و معایب سه روش PCA، CND-clr و CND-ilor برای تشخیص وضعیت عناصر غذایی در مزارع چغندر قند مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که روش PCA قادر به اولویت‌بندی همبستگی بین عناصر غذایی و عملکرد در مقیاس کلان بود، با این وجود، فاقد نرم‌های استاندارد برای ارزیابی در مقیاس خرد (کرت، مزرعه و باغ) است. در حالیکه دو روش CND-clr و CND-ilor با داشتن ارقام و استانداردهای مرجع امکان

نیترژن نقش کاهشی داشت؛ به عبارت دیگر، کاهش نیترژن و افزایش پتاسیم می‌تواند به ایجاد تعادل عنصری مطلوب‌تر و در نتیجه افزایش عملکرد منجر شود.

عناصر غذایی نشان داده شد. تحلیل مجموعه این مقایسه‌ها نشان داد که می‌توان با اطمینان بیشتری نتیجه گرفت که پتاسیم مهم‌ترین عنصر مؤثر در افزایش عملکرد ریشه چغندر قند است، در حالیکه

References

- Aitchison J. and M. Greenacre. 2002. "Biplots of Compositional Data," *Journal of the Royal Statistical Society Series C Applied*, Vol. 51, No. 4, pp. 375-392. DOI: 10.1111/1467-9876.00275
- Aitchison, J. 1986. *Statistical analysis of compositional data*. Chapman and Hall, New York
- Basirat M., Akhyani A., Daryashenas A.M (2016). Estimation of nutrient reference for Shahroudi grape variety using Compositional Nutrient Diagnosis (CND) method, *Journal of soil research*, 30 (1), (in Persian) doi:10.22092/IJSR.2016.106306
- Baxter I. R., Vitek O., Lahner B., Muthukumar B., Borghi M., Morrissey J., et al. 2008. *The leaf ionome as a multivariable system to detect a plant's physiological status*. Proc Natl Acad Sci U S A. 105(33):12081-6.
- Bergmann, W. 1988. *Ernährungs-störungen bei Kulturpflanzen*. 2. Auflage. Gustav Fischer.
- Chapman, H. D., and P. F. Pratt. 1978. *Method of Analysis for Soil and Water*. 2nd Ed., Chapter 17, p. 150-161. Uni. Calif.
- Cheraghi, M., Motesharezadeh, B. and Alikhani, H.A., 2020. Nutritional and morpho-physiological responses of tomato plant (*Lycopersicon esculentum* Mill) affected by biological and chemical fertilizers. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(10), pp.2559-2574.
- Daryashenas A.M., and Saghafi K, (2011). Compositional Nutrient Diagnosis(CND) in sugar beet", *Journal of soil research*, 25 (1), (in Persian) doi: 10.22092/IJSR.2011.126454
- Daryashenas A.M., Basirat M., Paknejad A. R. and Daryashenas S. (2017). Compositional Data Analysis Method for Diagnosing Micronutrients Status of Fall Sugar Beet with the approach of "Nutrients Balance", *Journal of soil research*, 31 (4), pp 497- 509. (in Persian) doi:10.22092/ijrsr.2018.115840
- Daryashenas A.M., Saghafi K, and Davoodi M. H. (2020). Diagnosis of Macro and Micro Nutrients Balance in Sugar Beet Using Mahalanobis Distance, Aitchison Distance, and Pan Balance, *Journal of soil research*, 34 (2), (in Persian) doi:10.22092/ijrsr.2020.122634
- Egozcue, J. J., Pawlowsky-Glahn, V., Mateu-Figueras, G., and Barceló-Vidal, C. 2003. Isometric log ratio transformations for compositional data analysis 1. *Math. Geol.* 35, 279-300.
- Emami, A. 1996. *Plant Analysis Methods*. Soil and Water Research Institute. Technical Publication No. 982, Tehran, Iran. (in Persian).
- Ghaderi, J. Akhiani, A. Khalkhal, Kamal. 2025. Nutritional status analysis of sugar beet in Shahroud county using the Compositional Nutrient Diagnosis (CND) method. *Journal of Soil Research/Volume 38/Number 4*.<https://doi.org/10.22092/ijrsr.2025.368423.768>
- Greenacre, M., Patrick J. F. Groenen, Trevor Hastie, Alfonso Iodice d'Enza, Angelos Markos, and Elena Tuzhilina (2023). *Principal Component Analysis* https://www.researchgate.net/publication/366501387_Principal_component_analysis#fullTextFileContent
- Helrich, K. 1990. *Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists*. Association of official analytical chemists.
- Hemke, P. H. Spark, D. L. DI, et al. 1996. Potassium. 551-74. *Sparks Method of soil analysis*. Published by: Madison, WI: Soil Science Society of America, Inc. American Society of Agronomy, Inc.
- Isaac, R. A., and J. D. Kerber. 1971. Atomic absorption and flame photometry: Techniques and uses in soil, plant, and water analysis. In: Walsh, L.M., (Ed.), *Instrumental Methods for Analysis of Soil and Plant Tissues*, 17-37. Madison: SSSA
- Jackson, J. (2016). *Learn Excel Basics with Quick Examples* (excel 2016, excel 2013, excel vba, Excel 2016, Excel Charts, Excel project, MS Excel, MS Excel book, spreadsheet excel) Vol. Volume 1 (North Charleston, SC, United States: CreateSpace Independent Publishing Platform), pp 128.
- Khademi, Z., Mohajermilani, P., Balali, M.R., Dorodi, M.S., Shahbazi, K. and Malakouti,

- M.J., 2001. A comprehensive computer model for fertilizer recommendation towards sustainable agriculture. *Soil and Water Research Institute, Tehran, Iran. (In Persian, abstract in English)*.
20. Khiari, L., L.E. Parent, and N. Tremblay. 2001. Critical compositional nutrient indexes for sweet corn at early growth stage. *Agron. J.* 93:809–814. doi: 10.2134/agronj2001.934809x
21. Malavolta, E. *Manual de nutrição de plantas*. 2006. Pav. Química, ESALQ and Ed. Agron. CERES, São Paulo, Brazil, 631 p.
22. Marschner, P. 2011. *Mineral Nutrition of Higher Plants, 3rd Edn.* London: Academic Press.
23. Melo G.W., Rozane, D.E., and Brunetto G. (2018) Identification of the critical levels, sufficiency ranges and potential response to nutrient fertilization in vineyards by the DRIS method. *Acta Hort.* 1217. ISHS 2018. Proc. VIII International Symposium on Mineral Nutrition of Fruit Crops Eds.: T. Mimmo, Y. Pii and F. Scandellari. DOI 10.17660/ActaHortic.2018.1217.55
24. Modesto Viviane Cristina, Serge-Étienne Parent, William Natale, and Léon Etienne Parent. 2014. Foliar Nutrient Balance Standards for Maize (*Zea mays* L.) at High-Yield Level. *American Journal of Plant Sciences*, 2014, 5, 497-507.
25. Parent Serge-Étienne, Philip Barlow and Léon E. Parent. 2012. Balance-based Nutrient Diagnosis of New Zealand kiwifruit orchards. Available at: <http://www.biosoil.co.nz/vdb/document/6>.
26. Parent, L. E. 2011. Diagnosis of the nutrient compositional space of fruit crops. *Rev. Bras. Frutic.* vol.33 no.1 Jaboticabal Mar. 2011. [Online]. Available at: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-29452011000100041>.
27. Pawlosky-Glahn, V.; Egozcue, J.J. 2008. Compositional data and Simpson's paradox. *Codawork*. In: Compositional analysis workshop, 3. 2008. Girona, Disponível. [Online]. Available at: <http://dugi-doc.udg.edu/bitstream/10256/718/1/>.
28. Rezaei, A. 1997. *Concepts of Statistics and Probability*, Mashhad Publication. (in Persian)
29. Ross, S.M. 1987. *Introduction to probability and statistics for engineers and scientists*. John Wiley & Sons, New York.
30. Rozane, D.E., Paula, B.V., Melo, G.W.B.; Santos, E.M.H.; Trentin, E.; Marchezan, C.; Silva, L.O.S.; Tassinari, A.; Dotto, L.; and Oliveira, F.N. 2020. Compositional nutrient diagnosis (CND) applied to grapevines grown in subtropical climate region. *Horticulturae* 2020, 6, 56. <https://doi.org/10.3390/horticulturae6030056>
31. Tadayon, M.S., Saghafi, K., and Sadeghi, S. Applying the compositional nutrient diagnosis (CND) to pomegranate (*Punica granatum* cv. 'Rabab') under saline and calcareous soil condition. *J. Plant Nutr.* 2023, 46, 1–16. <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2067762>
32. Wild, D. J. (2005). MINITAB release 14. doi: 10.1021/ci040130h
33. Zolfi Bavariani M., Ghaffarinejad, S. A. and M. Nowroozi, M. (2022). Evaluation of Nutritional Status and Priority of Nutrients Requirement of Tomato by Compositional Nutrient Diagnosis Method in Bushehr Province. *Journal of soil research*, 36 (1), (in Persian). doi:10.22092/ijsr.2022.126889



Impact of Spatial Resolution of Environmental Covariates on the Accuracy of Digital Soil Mapping: A Review Based on the SCORPAN Conceptual Framework

Rasoul Kharazmi^{a*} , and Mohsen Bagheri Bodaghabadi^a 

^a Soil and Water Research Institute (SWRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

Article Info

Article Type

Review Article

Received

March 07, 2026

Revised

May 09, 2026

Accepted

June 06, 2026

Published online

June 17, 2026

Keywords

Environmental Covariates,
Remote Sensing,
Digital Elevation Model,
Machine Learning,
Scale Mismatch

*Corresponding author's email

R.kharazmi@areeo.ac.ir

Extended Abstract

Background and Objectives: Digital Soil Mapping (DSM), as a modern data-driven approach, predicts the spatial distribution of soil physical and chemical properties based on the SCORPAN model. However, one of the keys and often overlooked factors influencing mapping accuracy is the spatial resolution of environmental covariates, which may either enhance or distort the true soil-forming patterns. This review article aims to examine and analyze the impact of the spatial resolution of environmental variables on the accuracy of DSM, particularly in arid and semi-arid regions of Iran. The specific objectives include: (i) identifying scalability challenges such as scale mismatch, noise amplification at very fine resolutions, and computational costs; (ii) providing optimized resolution recommendations based on landscape type; and (iii) proposing multi-scale approaches and advancements in machine learning to improve local accuracy and global generalizability. This review emphasizes the importance of adaptive spatial resolution selection for practical applications such as sustainable agriculture and evidence-based environmental policymaking under climate change. The focus on arid and semi-arid regions stems from the high sensitivity of these ecosystems to micro-scale variations, where inappropriate resolution may increase prediction errors by 30-50%. Ultimately, this study seeks to bridge theory and practice to enhance DSM as a more operational and effective tool.

Materials and Methods: This targeted review was conducted in accordance with the PRISMA 2020 statement. A comprehensive search was performed across major international and Persian databases, covering the period from 2000 to 2025. Search terms consisted of combinations of key DSM-related terminology. A total of 438 articles were initially identified. After removing duplicates, 302 articles remained for preliminary screening. Inclusion criteria comprised studies that directly or indirectly examined the effect of spatial resolution on DSM accuracy and evaluated at least one SCORPAN factor. Following full-text assessment, 150 articles were reviewed in detail, and ultimately 56 studies were included in the final analysis. Data extraction involved categorizing variables according to the SCORPAN framework, evaluating methodological approaches, validation metrics, strengths and limitations, and identifying emerging trends.

Results: The findings indicate that, in complex arid and semi-arid terrains, the spatial resolution of topographic variables should be as fine as 30 m to adequately capture local features such as rills and erosion patterns and to prevent excessive smoothing. Otherwise, the prediction accuracy of properties such as clay content or soil water storage may decline by 30-40%. For climatic variables, a spatial resolution finer than 250 m is essential in these regions to better model microclimates and their interactions with topography, thereby reducing unexplained variance. Biological and remote

sensing covariates require a spatial resolution of 10-30 m to capture seasonal and patchy vegetation dynamics in dry ecosystems, potentially improving prediction accuracy by up to 25%. Parent material and geological variables are generally adequate at 90-100 m resolution; however, in highly heterogeneous settings, integration with topographic data is necessary to improve the prediction of soil chemical properties. Soil age and spatial position variables play complementary roles, and their integration at moderate resolutions may reduce uncertainty by 10-20%. Recent advancements in machine learning algorithms and multi-scale modeling approaches have improved prediction accuracy across multiple spatial scales while addressing challenges such as scale mismatch. The recommendation framework suggests that in humid and temperate lowland regions, moderate spatial resolution is generally sufficient, whereas in arid and rugged landscapes, high spatial resolution for topography and vegetation is essential.

Conclusion: The analysis underscores that spatial resolution selection should be adaptive and dependent on landscape complexity, modeling objectives, and practical constraints to balance local accuracy, computational efficiency, and generalizability. In arid and semi-arid regions, high spatial resolution more effectively captures micro-scale patterns of erosion, salinization, and moisture distribution. However, it also introduces challenges such as increased noise, overfitting, and large data processing costs, which require careful methodological management. Scale mismatch among covariates increases unexplained variance and highlights the need for spatial harmonization. Advances in deep learning and three-dimensional modeling are transforming DSM from a static to a dynamic framework, improving predictive performance in environmentally sensitive ecosystems. Nevertheless, critical gaps remain, particularly the scarcity of historical soil age data in specific biomes. Ultimately, this study demonstrates that spatial resolution is not merely a technical parameter but a key determinant of uncertainty reduction, enabling digital soil mapping to evolve into a more effective tool for environmental policymaking and sustainable agriculture.

Cite this article: Kharazami, R., Bodaghabadi, M., 2026. Impact of Spatial Resolution of Environmental Covariates on the Accuracy of Digital Soil Mapping: A Review Based on the SCORPAN Conceptual Framework. Review Article, *Journal of Soil Research*, 40 (1), pp 105-126.



DOI: <https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.372398.815>

Publisher: Soil Science Society of Iran



تأثیر قدرت تفکیک مکانی متغیرهای محیطی بر دقت نقشه‌برداری رقومی خاک: مروری بر اساس

مدل مفهومی SCORPAN

رسول خوارزمی^{۱*} و محسن باقری بداغ آبادی^۱

^۱ مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

نقشه‌برداری رقومی خاک به‌عنوان رویکردی داده‌محور و مبتنی بر مدل‌های آماری و یادگیری ماشین، پیش‌بینی توزیع مکانی خواص خاک را به ویژگی‌های متغیرهای محیطی وابسته می‌سازد. از جمله ویژگی‌های متغیرهای محیطی که اغلب نادیده گرفته شده است، قدرت تفکیک مکانی متغیرهای محیطی می‌باشد که عامل کلیدی است و می‌تواند الگوهای واقعی خاک‌سازی را تقویت یا مخدوش کند. این مقاله مروری با تمرکز بر تأثیر قدرت تفکیک مکانی متغیرهای محیطی بر دقت این نقشه‌ها و براساس مدل مفهومی SCORPAN، به بررسی و تحلیل مطالعات متعدد می‌پردازد. یافته‌ها نشان می‌دهد که در مناطق خشک و نیمه‌خشک با چشم‌اندازهای ناهموار، متغیرهای توپوگرافیکی به قدرت تفکیک مکانی بالا (تا ۳۰ متر) نیاز دارند تا شاخص‌های ژئومورفومتریک دقیق‌تر محاسبه شوند و از صاف‌سازی بیش از حد جلوگیری گردد. متغیرهای اقلیمی در این مناطق به قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر، پوشش گیاهی و سنجش از دور به ۱۰ تا ۳۰ متر و مواد مادری به ۹۰ تا ۱۰۰ متر نیازمند هستند. متغیرهای سن خاک و موقعیت مکانی نیز نقش مکمل در کاهش واریانس تبیین‌نشده ایفا می‌کنند. چالش‌های اصلی شامل ناهماهنگی مقیاس، افزایش نویز در قدرت تفکیک مکانی بسیار بالا و هزینه‌های محاسباتی است که با رویکردهای چندمقیاسی، هماهنگ‌سازی داده‌ها و پیشرفت‌های سنجش از دور قابل مدیریت هستند. این بررسی تأکید دارد که انتخاب قدرت تفکیک مکانی باید تطبیقی و براساس پیچیدگی چشم‌انداز، اهداف مدل و محدودیت‌های عملی باشد تا دقت محلی افزایش و قابلیت تعمیم‌پذیری مدل‌های جهانی بهبود یابد تا خروجی پایانی برای انواع اهداف مورد نظر مانند کشاورزی پایدار، مدیریت منابع آب، ذخیره کربن خاک و سیاست‌گذاری زیست‌محیطی از دقت و کیفیت کافی برخوردار باشد.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۱۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۲۷

واژه‌های کلیدی

متغیرهای محیطی،

سنجش از دور،

مدل‌های رقومی ارتفاعی،

یادگیری ماشین،

ناهماهنگی مقیاس

* ایمیل نویسنده مسئول

R.kharazmi@Areco.ac.ir

استناد: خوارزمی، ر.، باقری بداغ آبادی، م.، ۱۴۰۵. تأثیر قدرت تفکیک مکانی متغیرهای محیطی بر دقت نقشه‌برداری رقومی خاک: مروری بر اساس

مدل مفهومی SCORPAN. مقاله مروری، نشریه پژوهش‌های خاک، (۱) ۴۰، ص ۱۰۵-۱۲۶.

DOI: <https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.372398.815>



مقدمه

کشاورزی و نیاز مبرم به امنیت غذایی پایدار برای جمعیت رو به رشد جهان بر جوامع بشری، دقت، قابلیت اعتماد و کارایی نقشه‌برداری رقومی خاک بیش از پیش حیاتی و راهبردی است. خاک نه تنها پایه و اساس تولید غذا است، بلکه نقش کلیدی و چندجانبه در ذخیره‌سازی کربن، تنظیم چرخه آب از طریق نفوذ و نگهداری رطوبت، پالایش آلاینده‌ها و سم‌زدایی محیط، حفظ زیست‌بوم‌ها با حمایت از تنوع ریزجانداران (میکروارگانیزم‌ها) و گیاهان و حتی تأثیر بر سلامت انسانی از طریق زنجیره غذایی ایفا می‌نماید. با این حال، یکی از عوامل تعیین‌کننده که در دقت این نقشه‌برداری اغلب نادیده گرفته شده، انتخاب قدرت تفکیک مکانی متغیرهای محیطی است که به عنوان پیش‌بینی‌کننده‌های اصلی عمل می‌کنند. این متغیرها شامل طیف وسیعی از داده‌ها مانند مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEM) با مشتقات ناهمواری (توپوگرافیکی)، داده‌های اقلیمی بلندمدت و کوتاه‌مدت، شاخص‌های پوشش گیاهی و سنجش از دور، نقشه‌های زمین‌شناسی و مواد مادری، داده‌های کاربری زمین و پوشش زمین و حتی داده‌های پویا مانند تغییرات فصلی رطوبت خاک؛ می‌شوند. قدرت تفکیک مکانی این داده‌ها می‌تواند از چند سانتی‌متر (مانند داده‌های پهپادها و لیدار) تا کیلومترها (مانند داده‌های جهانی اقلیمی) متغیر باشد (جدول ۱).

نقشه‌برداری رقومی خاک (Digital Soil Mapping; DSM) به عنوان یکی از دستاوردهای برجسته و تحول‌آفرین در علوم خاک‌شناسی مدرن، رویکردی داده‌محور، مبتنی بر مدل‌های آماری پیشرفته، هوش مصنوعی و یادگیری ماشین ارائه می‌دهد که امکان پیش‌بینی توزیع مکانی خواص خاک را در مقیاس‌های متنوع از محلی تا جهانی فراهم می‌سازد. این روش که ریشه در مدل مفهومی SCORPAN دارد و توسط McBratney و همکاران (۲۰۰۳) معرفی شد، روابط پیچیده، چندبعدی و غیرخطی بین خواص خاک مانند کربن آلی خاک، بافت خاک شامل درصد شن، سیلت، رس، اسیدیته (pH)، ظرفیت تبادل کاتیونی^۱ (CEC)، هدایت الکتریکی (EC)، محتوای مواد معدنی (مانند فسفر، پتاسیم، نیتروژن)، عمق خاک، تراکم ظاهری و سایر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی را با متغیرهای محیطی کمی‌سازی و مدل‌سازی می‌کند. در دنیای معاصر، با سیر صعودی چالش‌های جهانی مانند تغییرات اقلیمی با افزایش دما و الگوهای بارش نامنظم، کاهش تنوع زیستی به دلیل فعالیت‌های انسانی، آلودگی خاک از طریق سموم کشاورزی و صنعتی، فرسایش گسترده در مناطق

جدول ۱- مهم‌ترین متغیرهای محیطی مورد استفاده در نقشه‌برداری رقومی خاک**Table 1. The most important environmental covariates used in digital soil mapping.**

| SCORPAN Factor | Environmental Covariate | Sensor/Satellite | Common Spatial Resolution | Main Application in Soil Property Prediction | Key References |
|--------------------------------|--|--------------------------------------|---|---|--|
| R (Relief) | Digital Elevation Model & derivatives (slope, TWI, MrVBF, curvature) | LiDAR, SRTM, ASTER, TanDEM-X | 1-30 m (LiDAR/UAV) 30-90 m (SRTM/ASTER) | Soil texture, SOC, pH, moisture, erosion | Cavazzi et al. (2013); Smith et al. (2006); Zeraatpisheh et al. (2023); Garosi et al. (2022) |
| C (Climate) | Temperature, precipitation, evapotranspiration, bioclimatic indices | WorldClim, MODIS | 250 m - 1 km | SOC, pH, weathering processes | Hengl et al. (2017); Khosravani et al. (2024); Zeraatpisheh et al. (2023) |
| O (Organisms) | NDVI, EVI, LAI, Vegetation indices | Sentinel-2, Landsat-8/9, MODIS | 10-30 m (Sentinel-2/Landsat) | SOC, nutrients, soil texture, biological activity | Lamichhane et al. (2019); Khosravani et al. (2024); Garosi et al. (2022) |
| P (Parent Material) | Geological maps, lithology | National geological maps, Sentinel-2 | 90-100 m | pH, CEC, texture, nutrients, salinization | Bui et al. (2006); Nussbaum et al. (2018); Zeraatpisheh et al. (2023) |
| A & N (Age & Spatial Position) | Land use history, land cover, coordinates | Sentinel-2, Landsat (time series) | 10-30 m | SOC, pH, EC, salinization | Piedallu et al. (2022); Zeraatpisheh et al. (2023); Khosravani et al. (2024) |
| S (Soil) | Previous soil data, legacy soil maps | Field sampling + interpolation | Point data (integrated with 10-30 m) | Model calibration and validation | McBratney et al. (2003); Hengl et al. (2017) |

¹ Cation Exchange Capacity

می‌تواند روابط خاک- زمین‌نما را مخدوش سازد، الگوهای جریان آب سطحی را نادیده بگیرد و منجر به خطاهای پیش‌بینی تا ۳۰ الی ۴۰ درصد در ویژگی‌هایی مانند مقدار رس یا ذخیره آب خاک شود که این خطاها می‌توانند هزینه‌های اقتصادی بالایی برای کشاورزان به همراه داشته باشند (Cavazzi et al., 2013; Michalopoulou et al., 2022). دوم، در مقیاس‌های منطقه‌ای یا ملی، قدرت تفکیک مکانی متوسط (مانند ۱۰ تا ۵۰ متر) تعادل مناسبی بین دقت مدل، حجم داده و هزینه محاسباتی ایجاد می‌کند، اما در مقیاس‌های جهانی، قدرت تفکیک مکانی پایین‌تر (مانند ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ متر) اغلب برای مدل‌سازی کلی و شناسایی روندهای بزرگ مقیاس کافی است (Hengl et al., 2017; Cavazzi et al., 2013). هرچند در مناطق با تنوع بالا مانند اکوسیستم‌های مدیترانه‌ای با تغییرات شدید ارتفاعی، استوایی با پوشش گیاهی متراکم، یا نیمه‌خشک با الگوهای بارش نامنظم، منجر به تعمیم بیش از حد، از دست رفتن جزئیات محلی و کاهش دقت تا ۵۰ درصد می‌گردد (Radočaj et al., 2023).

هرچند در مناطق با تنوع بالا مانند زیست‌بوم‌های مدیترانه‌ای با تغییرات شدید ارتفاعی، استوایی با پوشش گیاهی متراکم، یا نیمه‌خشک با الگوهای بارش نامنظم، منجر به تعمیم بیش از حد^۴، از دست رفتن جزئیات محلی و کاهش دقت تا ۵۰ درصد می‌گردد (Radočaj et al., 2023). مطالعات نشان می‌دهند که ناهماهنگی قدرت تفکیک مکانی بین متغیرهای محیطی مختلف (مانند مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک مکانی بالا و داده‌های اقلیمی با قدرت تفکیک مکانی پایین)، می‌تواند واریانس تبیین‌نشده^۴ مدل را به طور قابل توجهی افزایش دهد، دقت کلی مدل‌های یادگیری ماشین را کاهش دهد و حتی منجر به تصمیم‌گیری‌های نادرست در مدیریت منابع شود (Kasraei et al., 2024). علاوه بر این، پیشرفت‌های فناوری سنجش از دور و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی مانند ماهواره‌های سنتینل-۱ و سنتینل-۲ با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ تا ۲۰ متر برای تصاویر راداری و نوری، لیدار هوایی و زمینی برای تولید مدل‌های رقومی ارتفاعی با دقت سانتی‌متری، پهپادهای UAV مجهز به دوربین‌های فرایطیفی و چند طیفی برای داده‌های محلی، داده‌های اقلیمی جهانی مانند WorldClim یا IRI-5 با قدرت تفکیک مکانی بهبودیافته تا ۲۵۰ متر و سکوه‌های ابری مانند گوگل ارث انجین برای پردازش داده‌های حجیم، دسترسی به داده‌های با کیفیت بالا را به طور چشمگیری

علاوه بر قدرت تفکیک مکانی، سطح دقت (vertical/horizontal accuracy) و عدم قطعیت سنجنده‌ها نیز عامل بسیار مهمی در کیفیت نهایی نقشه‌برداری رقومی خاک محسوب می‌شود. برای مثال، داده‌های LiDAR دقت عمودی بسیار بالایی (معمولاً کمتر از ۰/۱۵ تا ۰/۳ متر) دارند، در حالی که SRTM و ASTER دارای خطای عمودی ۴ تا ۱۶ متر هستند (Preety et al., 2022). این تفاوت در دقت عمودی، به‌ویژه هنگام محاسبه شاخص‌های ژئومورفومتریک حساس، منجر به خطاهای سیستماتیک قابل توجه می‌شود.

در داده‌های سنجش از دور نیز، سنسورهایی مانند Sentinel-2 با وجود قدرت تفکیک مکانی مناسب، تحت تأثیر عوامل جوی، زاویه دید و پدیده پیکسل مختلط^۲ قرار می‌گیرند که عدم قطعیت را افزایش می‌دهد (Khosravani et al., 2024). بنابراین، انتخاب متغیرهای محیطی باید نه تنها بر اساس قدرت تفکیک مکانی، بلکه با توجه به سطح دقت سنجنده و روش‌های کاهش عدم قطعیت انجام شود.

انتخاب قدرت تفکیک مکانی نامناسب نه تنها می‌تواند الگوهای واقعی را مخدوش کند، بلکه منجر به افزایش خطاهای نظام‌دار و تصادفی در مدل‌ها می‌شود که این امر بر کاربردهای عملی مانند برنامه‌ریزی کشاورزی، مدیریت منابع آب و سیاست‌های زیست‌محیطی تأثیر منفی می‌گذارد. اهمیت بررسی تأثیر قدرت تفکیک مکانی متغیرهای محیطی بر نقشه‌برداری رقومی خاک از جنبه‌های متعدد علمی، کاربردی، اقتصادی و سیاست‌گذاری ناشی می‌شود و می‌تواند به عنوان پلی بین نظریه و عمل باشد. نخست، در مقیاس‌های محلی مانند مزارع کشاورزی، جنگل‌های کوچک، حوضه‌های آبخیز محلی یا حتی مکان‌های معدنی، قدرت تفکیک مکانی بالا امکان شناسایی الگوهای دقیق و جزئی فرآیندهای خاک ساخت مانند فرسایش انتخابی، تجمع رسوبات و مواد مغذی، توزیع میکروارگانیزم‌ها، تغییرات میکروتوپوگرافی و حتی تأثیر ریشه گیاهان بر ساختار خاک را فراهم می‌آورد. این امر نه تنها مدیریت دقیق کشاورزی را تسهیل می‌کند، بلکه به کاهش مصرف کودهای شیمیایی تا ۲۰ الی ۳۰ درصد، بهینه‌سازی مصرف آب آبیاری، افزایش بهره‌وری محصول تا ۱۵ درصد و کاهش آلودگی محیطی کمک شایانی می‌نماید (Piedallu et al., 2022; Bohnand et al., 2025). برای مثال، در مناطق کوهستانی یا تپه‌ای با ناهمواری پیچیده، قدرت تفکیک مکانی پایین (مانند ۹۰ متر)

⁴ Unexplained Variance

² mixed-pixel

³ Overgeneralization

افزایش داده است. با این حال، این پیشرفت‌ها چالش‌های متعددی نظیر مدیریت داده‌های حجیم^۵ با حجم تنبایتی، نیاز به پردازش محاسباتی پیشرفته (مانند محاسبات مبتنی بر GPU و الگوریتم‌های توزیع‌شده)، مسائل مقیاس‌پذیری در مدل‌های بزرگ، مشکلات همخوانی مقیاس‌ها بین داده‌های میدانی (نقطه‌ای) و متغیرهای محیطی (پیکسلی) و حتی مسائل اخلاقی مانند حفظ حریم خصوصی در داده‌های محلی را به همراه آورده‌اند (Guo et al., 2017; Sediqi et al., 2025). از دیدگاه پایداری جهانی، سازمان ملل متحد در اهداف توسعه پایدار، بر نیاز به نقشه‌های خاک دقیق با اهداف پایان‌گرسانی و امنیت غذایی از طریق کشاورزی پایدار، اقدام برای تغییرات اقلیمی با تمرکز بر ذخیره کربن خاک، حفظ زندگی روی زمین با جلوگیری از فرسایش و آلودگی خاک، آب پاک و بهداشت با مدیریت رطوبت خاک و شهرهای پایدار با خاک‌های شهری؛ تأکید دارد. این اهداف بخشی از دستور کار ۲۰۳۰ برای توسعه پایدار هستند که در سال ۲۰۱۵ توسط مجمع عمومی سازمان ملل متحد تصویب شد و شامل ۱۷ هدف اصلی برای پایان دادن به فقر، حفاظت از سیاره و تضمین رفاه برای همه تا سال ۲۰۳۰ است (United Nations, 2015). برای نمونه، نقشه‌برداری دقیق کربن آلی خاک (SOC) امکان برآورد دقیق‌تر ذخیره کربن را فراهم می‌کند و سیاست‌های کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را حمایت می‌نماید. با این حال، قدرت تفکیک مکانی نامناسب، مانند استفاده از متغیرهای کمکی با قدرت تفکیک مکانی پایین در مدل‌های جهانی، می‌تواند برآوردهای ذخیره کربن را به طور قابل توجهی تحریف کند و منجر به سیاست‌های ناکارآمد یا عدم اعتماد در بازارهای کربن^۶ شود (Oldfield et al., 2019). با این وجود، شکاف‌های دانشی قابل توجهی مانند عدم بررسی جامع تأثیر قدرت تفکیک مکانی بر مدل‌های پیشرفته یادگیری عمیق مانند شبکه‌های عصبی پیچشی یا مدل‌های GAN^۷، تأثیر در زیست‌بوم‌های خاص مانند مناطق خشک و نیمه‌خشک که بیش از ۴۰ درصد زمین‌های جهان را پوشش می‌دهند و حساس به تغییرات قدرت تفکیک مکانی هستند، ادغام متغیرهای محیطی پویا مانند تغییرات فصلی پوشش گیاهی یا رطوبت خاک و حتی ارزیابی اقتصادی هزینه-فایده قدرت تفکیک مکانی‌های مختلف وجود دارد. این مقاله مروری، با تمرکز بر تأثیر قدرت تفکیک مکانی متغیرهای محیطی بر دقت نقشه‌برداری رقومی خاک، به بررسی انواع متغیرهای محیطی بر اساس مدل

روشن‌شناسی مرور هدفمند

در این مرور هدفمند، از راهنمای به‌روزشده گزارش‌دهی

مرورهای هدفمند یعنی بیانیه PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) استفاده شده است. این بیانیه راهنمایی‌های به‌روز برای شناسایی، انتخاب، ارزیابی و ترکیب مطالعات ارائه می‌دهد (Page et al., 2021). مقالات از پایگاه‌های داده اصلی شامل Web of Science، Scopus، Google Scholar و پایگاه‌های فارسی مانند SID و MagIran جمع‌آوری شدند و دوره زمانی جستجو از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵ را پوشش داد.

جستجوی هدفمند با هدف انتخاب مقالات منتشرشده کامل در مجلات داوری شده انجام شد. عبارت‌های جستجو به‌گونه‌ای طراحی گردیدند که بیشترین مقالات مرتبط با هدف مرور را شامل شوند. جستجو در بخش‌های عنوان، چکیده و کلمات کلیدی با استفاده از ترکیب زیر انجام گرفت:

"Digital soil mapping" یا "DSM" یا "نقشه برداری رقومی خاک"

"Spatial Resolution" یا "مقیاس" یا "قدرت تفکیک مکانی" یا "Environmental covariates" یا "SCORPAN" یا "متغیرهای محیطی"

جستجو به زبان‌های فارسی و انگلیسی محدود شد و نوع سند به مقاله و حوزه‌های موضوعی به علوم خاک، کشاورزی، سنجش از دور و علوم محیطی محدود گردید.

غربالگری مقالات

در مجموع، ۴۳۸ مقاله از جستجو در پایگاه‌های داده شناسایی شد. پس از شناسایی و حذف ۱۳۶ مقاله تکراری، ۳۰۲ مقاله برای ارزیابی بیشتر بر اساس معیارهای ورود باقی ماند. معیارهای ورود به شرح زیر بودند:

^۸ Generative Adversarial Networks

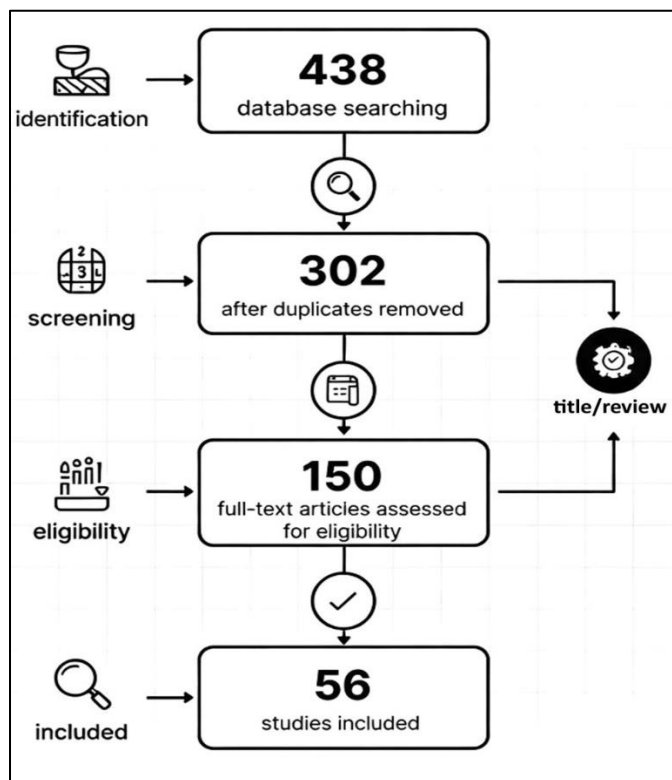
^۵ Big Data

^۶ Soil Carbon Markets

^۷ Convolutional Neural Networks

پس از بررسی دقیق عنوان و چکیده، ۱۵۰ مقاله برای مطالعه کامل متن انتخاب شد. در نهایت، پس از بررسی کامل متن، ۵۶ مقاله تمامی معیارهای ورود را برآورده کرده و در این مرور گنجانده شدند. شکل یک جریان مرور از مرحله جستجو تا تصمیم نهایی برای مقالات وارد شده را نشان می‌دهد.

مطالعاتی که به طور مستقیم یا غیرمستقیم تأثیر قدرت تفکیک مکانی متغیرهای محیطی بر دقت نقشه‌برداری رقومی خاک را بررسی کنند، مطالعاتی که حداقل یکی از عوامل مدل مفهومی SCORPAN را در رابطه با قدرت تفکیک مکانی ارزیابی کرده باشند، انتشار در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵.



شکل ۱- فرآیند جستجو و انتخاب مقالات بر اساس بیانیه PRISMA 2020

Figure 1. The process of searching for and selecting articles based on the PRISMA 2020 statement

مرور منابع

متغیرهای ناهمواری و تأثیر قدرت تفکیک مکانی مدل‌های رقومی ارتفاعی

متغیرهای ناهمواری که عمدتاً از تصاویر رقوم ارتفاعی مشتق می‌شوند، شامل ویژگی‌هایی مانند ارتفاع، شیب، جهت شیب، انحنای سطح، شاخص رطوبت ناهمواری (TWI)^{۱۰}، عامل طول-شیب، شاخص موقعیت ناهمواری، جریان تجمعی، شاخص چندمقیاسی سطح بودن کف دره (MrVBF)^{۱۱}، بافت سطح زمین، عمق دره^{۱۲}، سطح پایه شبکه کانالی (CNBL)^{۱۳} و حتی شاخص‌های پیشرفته چندمقیاسی مانند شاخص رطوبت ناهمواری (Multiscale

برای انجام این مرور مرجع، از روش‌شناسی هدفمند پیروی شده است که شامل تعریف معیارهای ورود و خروج، جستجوی جامع در پایگاه‌های معتبر داده، غربالگری مقالات، استخراج داده‌ها و تحلیل کیفی است. متغیرهای محیطی بر اساس مدل مفهومی SCORPAN دسته‌بندی شده‌اند و تحلیل شامل ارزیابی روش‌شناختی، مقایسه و شاخص‌های اعتبارسنجی، نقاط قوت (مانند ادغام داده‌های چندمنبع)، ضعف‌ها (مانند سوگیری داده^۹ و بیش‌برازش) و روندها (مانند تغییر به هوش مصنوعی و مدل‌های زمانی- مکانی) است.

¹² Valley Depth

¹³ Channel Network Base Level

⁹ Data Bias

¹⁰ Topographic Wetness Index

¹¹ Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness

توپوگرافی به نوع ویژگی مورد بررسی نیز مرتبط است. علاوه بر این، رابطه مشتقات مدل رقومی ارتفاعی با ویژگی‌های خاک، اساساً فرآیندمحور است. شاخص‌هایی مانند TWI و MrVBF مستقیماً فرآیندهای هیدرولوژیکی، فرسایش و رسوب‌گذاری را توصیف می‌کنند که خود بر توزیع مکانی ویژگی‌های خاک تأثیرگذار هستند (Cavazzi et al., 2013). نکته مهم دیگر، تفاوت کیفی بین منابع مختلف DEM است. دقت LiDAR نه تنها به دلیل قدرت تفکیک مکانی بالاتر، بلکه عمدتاً به خاطر دقت عمودی بسیار بالا (معمولاً کمتر از 0/2 متر) و کاهش چشمگیر عدم قطعیت نسبت به SRTM (با خطای عمودی ۴ تا ۱۶ متر) است. این برتری باعث بهبود قابل توجه محاسبه شاخص‌های ژئومورفومتریک حساس و در نتیجه افزایش دقت مدل‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی خواص خاک، به‌ویژه در چشم‌اندازهای ناهموار می‌شود (Preety et al., 2022).

پژوهش‌های اخیر بر بهینه‌سازی قدرت تفکیک مکانی و مقایسه منابع مدل‌های رقومی ارتفاعی (مانند LIDAR، SRTM، ASTER و TanDEM-X) تمرکز کرده‌اند و تحلیل آن‌ها نشان‌دهنده روند به سمت قدرت تفکیک مکانی چندمقیاسی است. برای مثال، Zeraatpisheh و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین و متغیرهای محیطی با قدرت تفکیک مکانی چندگانه، تأثیر قدرت تفکیک مکانی بر پیش‌بینی ذخیره کربن آلی خاک را بررسی کردند و نشان دادند که قدرت تفکیک مکانی متوسط (۲۰ تا ۵۰ متر) تعادل مناسبی بین دقت پیش‌بینی، کاهش نویز و هزینه محاسباتی برقرار می‌کند. این مطالعه تأکید می‌کند که قدرت تفکیک مکانی پایین‌تر در مناطق مسطح دقت را کمتر تحت تأثیر قرار می‌دهد، اما در مناطق ناهموار خطای پیش‌بینی را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. مقایسه این مطالعه با Simbahan و همکاران (۲۰۰۶) که تجمیع قدرت تفکیک مکانی نامناسب واریانس مدل را تا ۲۰ درصد افزایش می‌دهد، نشان می‌دهد تمرکز بر قدرت تفکیک مکانی چندمقیاسی می‌تواند این محدودیت را کاهش دهد. در مطالعه Wu و همکاران (۲۰۰۸)، اثر قدرت تفکیک مکانی مدل‌های رقومی ارتفاع بر روابط خاک - توپوگرافی بررسی شد و قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متری برای بافت بهینه یافت شد که با پژوهش زراعت پیشه و همکاران (۲۰۲۳) همخوانی دارد اما با Thompson و همکاران (۲۰۰۱) تفاوت دارد که قدرت تفکیک مکانی پایین مدل‌های رقومی ارتفاعی، مقادیر شیب را کم برآورد می‌کند و روابط فرسایشی و خاک را تحریف می‌نماید. تحلیل نشان می‌دهد مطالعه Thompson و همکاران (۲۰۰۱) پایه‌ای و بر محاسبات کلی ویژگی‌های زمین تمرکز دارد، در حالی که Wu و همکاران (۲۰۰۸) بر کاربردهای

(TWI) هستند. این متغیرها فرآیندهای آب‌شناختی (هیدرولوژیکی)، فرسایشی، توزیع مواد و روابط زنجیره‌ای را توصیف می‌کنند و نقش محوری در نقشه‌برداری رقومی خاک ایفا می‌نمایند، زیرا پستی و بلندی اغلب عامل غالب در تغییرات محلی خواص خاک است. مطالعات اولیه بر تأثیر قدرت تفکیک مکانی مدل‌های رقومی ارتفاعی تمرکز داشتند. برای مثال، Kuryakova و Florinsky (۲۰۰۰) در مطالعه‌ای بر روی تعیین اندازه شبکه برای مدل‌سازی زمین، با مثالی از توزیع رطوبت خاک در مقیاس میکرو، نشان دادند که افزایش قدرت تفکیک مکانی مدل‌های ارتفاعی دیجیتال از ۵ متر به ۵۰ متر، دقت مدل را کاهش می‌دهد، زیرا جزئیات محلی مانند شیارها و پستی‌بلندی‌های کوچک را از دست می‌دهد و منجر به صاف‌سازی بیش از حد سطح می‌شود که این امر روابط آب‌شناختی را تحریف می‌کند. تحلیل این مطالعه نشان می‌دهد که قدرت تفکیک مکانی پایین‌تر حساسیت مدل به تغییرات محلی را کاهش می‌دهد؛ اما در مقایسه با مطالعه Smith و همکاران (۲۰۰۶) در مناطق غربی ایالات متحده که قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متری مدل‌های رقومی ارتفاعی مستخرج از لیدار برای پیش‌بینی محتوای رس به ضریب تعیین ۰/۷۵ رسید در حالی که قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متری تصاویر رقومی ارتفاعی SRTM آن را به ۰/۶۰ کاهش داد، می‌بینیم که تأثیر قدرت تفکیک مکانی در مناطق ناهموار بیشتر است. در واقع، مطالعه Kuryakova و Florinsky (۲۰۰۰) بیش از حد بر فرسایش تمرکز دارد و محدودیت آن عدم بررسی مدل‌های یادگیری ماشین است، در حالی که Smith و همکاران (۲۰۰۶) با جنگل تصادفی نتایج قوی‌تری ارائه می‌دهد اما هزینه لیدار را نادیده می‌گیرد. مقایسه با Cavazzi و همکاران (۲۰۲۲) در یک مطالعه گسترده در اروپا که مدل‌های رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک مکانی بالا (۱ تا ۵ متر) با استفاده از لیدار را ارزیابی کردند و گزارش کردند که این قدرت تفکیک مکانی دقت پیش‌بینی pH خاک را ۱۸ درصد بهبود می‌بخشد، اما در دشت‌ها، قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متری کافی است و قدرت تفکیک مکانی بالاتر منجر به بیش‌برازش مدل می‌شود. این یافته نشان می‌دهد که پیشرفت‌های فناوری لیدار قدرت تفکیک مکانی را حیاتی‌تر کرده، اما در دشت‌ها، قدرت تفکیک مکانی متوسط اقتصادی‌تر است که این موضوع با یافته‌های Florinsky و Kuryakova (۲۰۰۰) همخوانی دارد اما با مطالعه Smith و همکاران (۲۰۰۶) تفاوت دارد زیرا مطالعه Smith و همکاران بر بافت تمرکز دارد. این موضوع نشان می‌دهد که تغییر قدرت تفکیک مکانی متغیرهای توپوگرافی به نوع ویژگی مورد بررسی نیز مرتبط است. این موضوع نشان می‌دهد که تغییر قدرت تفکیک مکانی متغیرهای

نشان می‌دهد (Grohmann et al., 2010). در مناطق خشک و نیمه‌خشک، جایی که فرسایش بادی غالب است، قدرت تفکیک مکانی بزرگ‌تر برای شناسایی دقیق الگوهای میکروتوپوگرافی ضروری است، زیرا این الگوها بر توزیع تنش باد، آستانه فرسایش و نرخ حمل رسوب تأثیر مستقیم دارند و قدرت تفکیک مکانی پایین‌تر منجر به برآورد کم زبری سطح و تحریف مدل‌های فرسایش می‌شود (Yan et al., 2022). شاخص عمق دره^{۱۶} و CNBL نیز برای شناسایی شبکه‌های زهکشی و مناطق تجمع استفاده می‌شوند (Conrad et al., 2015). Rocha و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای بر روی تأثیر قدرت تفکیک مکانی مدل‌های رقومی ارتفاعی بر پاسخ‌های هیدرولوژیکی یک حوضه پلکانی، نشان دادند که شاخص‌های ناهمواری مانند عمق دره و CNBL در قدرت تفکیک مکانی بالا دقت روابط زنجیره‌ای را افزایش می‌دهند، اما در قدرت تفکیک مکانی پایین، خطای هدفمند ایجاد می‌کنند که منجر به تحریف الگوهای جریان و زهکشی می‌شود. در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، مطالعات Garosi و همکاران (۲۰۲۲) و Taghizadeh Mehrjerdi و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که شاخص‌هایی مانند MrVBF و عمق دره در قدرت تفکیک مکانی ۱۰ تا ۳۰ متر، دقت پیش‌بینی کربن آلی خاک و بافت را در شرایط فرسایش شدید بهبود می‌بخشند، زیرا این مناطق به تغییرات محلی دره‌ها و کانال‌ها حساس هستند و قدرت تفکیک مکانی پایین الگوهای فرسایش را نادیده می‌گیرد. زراعت‌پیشه و همکاران (۲۰۲۳) در ایران نیز MrVBF را به‌عنوان یکی از متغیرهای کلیدی در مدل‌های چندمقیاسی استفاده کردند و گزارش کردند که قدرت تفکیک مکانی بالاتر از ۲۵ متر منجر به کاهش دقت در پیش‌بینی ذخیره کربن آلی خاک می‌شود. تحلیل کلی این بخش نشان می‌دهد که مطالعات متعدد بر لزوم همخوانی قدرت تفکیک مکانی مدل‌های رقومی ارتفاعی با پیچیدگی چشم‌انداز^{۱۷} تأکید دارند. هرچند شکاف‌هایی در بررسی کاربرد مدل‌های یادگیری عمیق همچنان وجود دارد و روند پژوهشی به سمت رویکردهای قدرت تفکیک مکانی تطبیقی گرایش یافته است. Smith و همکاران (۲۰۰۶) تأثیر قدرت تفکیک مکانی مدل‌های رقومی ارتفاعی را بر نقشه‌برداری رقومی خاک بررسی کردند و نشان دادند که قدرت تفکیک مکانی بالا دقت را بهبود می‌بخشد اما در مقابل بررسی Cavazzi و همکاران (۲۰۱۳) نشان می‌دهد که مدل‌های ارتفاعی دیجیتال با قدرت تفکیک مکانی بیشتر همیشه نتایج بهتری را ارائه نمی‌دهد.

مستقیم در روابط خاک-زمین‌نما و پیش‌بینی خواص خاک تأکید می‌کنند. Setargie و همکاران (۲۰۲۲) تأثیر قدرت تفکیک مکانی مدل‌های ارتفاعی رقومی بر پیش‌بینی فرسایش خندقی را بررسی کردند و قدرت تفکیک مکانی بالا (۱ متر) دقت ۹۲ درصد فراهم کرد. این مطالعه نسبت به پژوهش Zhang و همکاران (۲۰۰۸) که قدرت تفکیک مکانی و منبع مدل‌های رقومی ارتفاعی را بر مدل‌سازی فرسایش بررسی کردند، نشان‌دهنده تکامل به سمت لیدار است اما هزینه بالا را نادیده می‌گیرد. پژوهش‌های اخیر بر بهینه‌سازی قدرت تفکیک مکانی و مقایسه منابع مدل‌های رقومی ارتفاعی مانند CARTOSAT، SRTM، ASTER، LIDAR و CARTOSAT تمرکز کرده‌اند و تحلیل آن‌ها نشان‌دهنده روند به سمت قدرت تفکیک مکانی چندمقیاسی است. برای مثال، Preety و همکاران (۲۰۲۲) در ارزیابی دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی معمول (شامل CARTOSAT ۳۰ متری در مقایسه با SRTM و TanDEM-X)، نشان دادند که قدرت تفکیک مکانی پایین‌تر در مناطق ناهموار منجر به کاهش دقت ارتفاعی و عملکرد کلی DEM می‌شود که این امر بر کاربردهای هیدرولوژیکی و نقشه‌برداری خاک تأثیر منفی می‌گذارد. این یافته با مطالعات قبلی همخوانی دارد که تجمیع قدرت تفکیک مکانی نامناسب واریانس مدل را افزایش می‌دهد.

علاوه بر شاخص‌های پایه‌ای، شاخص‌های پیشرفته‌تر مشتق از مدل‌های رقومی ارتفاعی مانند MrVBF که توسط Gallant و Dawling (۲۰۰۳) معرفی شد، برای شناسایی مناطق مسطح کف دره و تجمع رسوبات استفاده می‌شود و در نقشه‌برداری رقومی خاک نقش مهمی در پیش‌بینی توزیع رس و مواد آلی ایفا می‌کند. تحلیل مطالعات نشان می‌دهد که قدرت تفکیک مکانی بالا برای محاسبه دقیق MrVBF ضروری است، زیرا این شاخص به مقیاس‌های چندگانه حساس است و قدرت تفکیک مکانی پایین منجر به شناسایی نادرست دره‌ها می‌شود. برای مثال، Grohmann و همکاران (۲۰۱۰) در تحلیل چندمقیاسی زبری سطح توپوگرافی^{۱۴}، نشان دادند که شاخص‌های چندمقیاسی مانند MrVBF در ارزیابی ناهمواری سطح مؤثر هستند، اما عملکرد آن‌ها بسته به مقیاس و نوع چشم‌انداز متفاوت است و در مناطق رسوبی، MrVBF برای شناسایی مناطق رسوب‌گذاری مفیدتر عمل می‌کند. شاخص بافت سطح زمین^{۱۵} برای توصیف زبری و ناهمواری سطح زمین استفاده می‌شود و به عنوان یک ویژگی زمین‌ریخت‌سنجی (ژئومورفومتریک)، تغییرات ناهمواری را در مقیاس‌های مختلف

¹⁶ Valley Depth¹⁷ Landscape Complexity¹⁴ Topographic Surface Roughness¹⁵ Terrain Surface Texture

تأثیر معناداری بر عملکرد نهایی مدل‌های یادگیری ماشین دارد و نباید صرفاً به قدرت تفکیک مکانی افقی محدود شود (Cavazzi et al., 2013)؛ بنابراین، هرچند نتایج مطالعات جهانی بر برتری رزولوشن بالا در چشم‌اندازهای پیچیده تأکید دارند، اما در شرایط ایران، انجام مطالعات مقایسه‌ای بیشتر با رزولوشن‌های مختلف ضروری به نظر می‌رسد. تحلیل جامع مطالعات نشان می‌دهد که انتخاب قدرت تفکیک مکانی بهینه، تعادل مناسبی بین دقت پیش‌بینی، حفظ جزئیات محلی و محدودیت‌های محاسباتی و هزینه‌ای برقرار می‌کند. با این حال، در چشم‌اندازهای ناهموار و به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران که فرآیندهای فرسایش بادی و آبی شدید و الگوهای میکروتوپوگرافی پیچیده هستند، استفاده از قدرت تفکیک مکانی بالاتر برای محاسبه دقیق شاخص‌های زمین‌ریخت‌سنجی پیشرفته نظیر شاخص MrVBF، بافت سطح زمین، عمق دره و CNBL ضروری است. این شاخص‌ها به دلیل حساسیت بالای خود به تغییرات مقیاسی و محلی، امکان شناسایی دقیق‌تر الگوهای تجمع رسوبات، شبکه‌های زهکشی و مناطق رسوب‌گذاری را فراهم می‌آورند و در صورت استفاده از قدرت تفکیک مکانی پایین‌تر، منجر به صاف‌سازی بیش از حد^{۱۸}، از دست رفتن جزئیات کلیدی و افزایش خطای نظام‌دار در مدل‌سازی فرآیندهای خاک‌سازی می‌گردند. این موضوع نه تنها دقت محلی نقشه‌برداری را بهبود می‌بخشد، بلکه بر قابلیت تعمیم‌پذیری و اعتبار مدل‌های جهانی مانند SoilGrids نیز تأثیر مثبت و معناداری خواهد داشت

متغیرهای اقلیمی و قدرت تفکیک مکانی آن‌ها

متغیرهای اقلیمی به عنوان یکی از اجزای کلیدی مدل مفهومی SCORPAN، شامل ویژگی‌هایی مانند دما (میانگین، حداکثر و حداقل سالانه و فصلی)، بارش (مجموع سالانه، فصلی و رویدادهای شدید)، تبخیر و تعرق (واقعی و بالقوه)، شاخص‌های زیستی، تابش خورشیدی، سرعت باد، شاخص خشکی و شاخص‌های مرتبط با تغییرات اقلیمی مانند شدت گرما هستند. این متغیرها عمدتاً مشتق از داده‌های حاصل از ایستگاه‌های هواشناسی، ماهواره‌ها و مدل‌های عددی اقلیمی جهانی هستند و معمولاً با قدرت تفکیک مکانی پایه‌ای بین ۱ کیلومتر تا ۲۵۰ متر ارائه می‌گردند. این داده‌ها نقش مهمی در توصیف فرآیندهای هوازدگی شیمیایی، تجزیه مواد آلی و توزیع زیستی خاک ایفا می‌کنند و در نقشه‌برداری رقومی خاک به عنوان پیش‌بینی‌کننده‌های مقیاس بزرگ به کار می‌روند. برای مثال،

Wu و همکاران (۲۰۰۸) در مطالعه‌ای بر روی تأثیر قدرت تفکیک مکانی مدل‌های رقومی ارتفاعی بر روابط خاک - چشم‌انداز در مناطق تپه‌ای، نشان دادند که قدرت تفکیک مکانی متوسط تعادل مناسبی بین دقت پیش‌بینی خواص خاک و حفظ جزئیات محلی فراهم می‌کند، در حالی که قدرت تفکیک مکانی پایین‌تر منجر به کاهش دقت مدل‌سازی روابط خاک-توپوگرافی می‌شود. در راستای همین مطالعه؛ Cavazzi و همکاران (۲۰۱۳) نیز قدرت تفکیک مکانی متوسط را برای حفظ تعادل بین دقت و پیچیدگی محاسباتی مدل‌های رقومی ارتفاعی در مطالعه روابط خاک-چشم‌انداز در مناطق کوهستانی پیشنهاد کردند. همچنین، در بررسی دقت مدل‌های فرسایش خندقی، Dai و همکاران (۲۰۱۹) نیز قدرت تفکیک مکانی متوسط را پیشنهاد دادند. Grohmann و همکاران (۲۰۱۰) در تحلیل چندمقیاسی زبری سطح توپوگرافی، نشان دادند که قدرت تفکیک مکانی بر شاخص‌های کمی زبری سطح (مانند Terrain Surface Texture، Surface Roughness و معیارهای آماری ارتفاع در پنجره‌های متحرک) تأثیرگذار است. این شاخص‌ها در مقیاس‌های مختلف رفتار متفاوتی نشان می‌دهند و انتخاب مقیاس مناسب برای محاسبه دقیق آنها، به نوع چشم‌انداز و ویژگی خاک مورد نظر بستگی دارد.

در نتیجه، متغیرهای ناهمواری به عنوان یکی از مهم‌ترین و غالب‌ترین پیش‌بینی‌کننده‌ها در نقشه‌برداری رقومی خاک عمل می‌کنند و نقش محوری در توصیف فرآیندهای خاک‌سازی مرتبط با توپوگرافی، از جمله فرسایش، رسوب‌گذاری، توزیع رطوبت و مواد آلی و روابط زنجیره‌ای ایفا می‌نمایند. این استنباط بر پایه مرور گسترده مطالعات جهانی و ایرانی استوار است. با این حال، باید به این نکته توجه داشت که در اکثر مطالعات انجام‌شده در ایران، عمدتاً از رزولوشن ۳۰ متری (مانند SRTM یا ASTER) استفاده شده و اطلاعات محدودی در مورد عملکرد رزولوشن‌های خیلی بالا (۱۰ متر و کمتر) یا خیلی پایین (۹۰ متر و بیشتر) در شرایط متنوع کشور وجود دارد (Garosi et al., 2022; Zeraatpisheh et al., 2023). علاوه بر این، انتخاب بهینه قدرت تفکیک مکانی به نوع ویژگی خاک مورد نظر نیز وابسته است. به‌طوری‌که برخی ویژگی‌ها (مانند کربن آلی و رطوبت) حساسیت بیشتری به شاخص‌های دقیق توپوگرافی نشان می‌دهند، در حالی که برخی خواص دیگر ممکن است با رزولوشن متوسط نیز پیش‌بینی مناسبی داشته باشند. همچنین، دقت و عدم قطعیت خود متغیرهای کمکی توپوگرافیکی (مانند تفاوت قابل توجه دقت عمودی LiDAR نسبت به SRTM)

می‌تواند اثربخشی پیش‌بینی را افزایش دهد، هر چند پوشش گسترده آن با محدودیت عدم تحلیل عمیق مدل‌های خاص همراه است. در مقایسه، Fick و Hijmans (۲۰۱۷) در توسعه پایگاه داده WorldClim2، قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتری را برای کاربردهای جهانی نقشه‌برداری رقومی خاک توصیه کردند و نشان دادند که این اندازه خطای درون‌یابی را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. با این حال، تحلیل نشان می‌دهد که این رویکرد پایه‌ای است اما در مقایسه با Zeraatpisheh و همکاران (۲۰۲۳) که در مناطق نیمه‌خشک ایران نشان دادند قدرت تفکیک مکانی پایین‌تر (مانند ۱ کیلومتر) ۱۰ تا ۱۵ درصد خطا در پیش‌بینی ذخیره کربن آلی خاک ایجاد می‌کند. مطالعه Fick و Hijmans (۲۰۱۷) محدود به داده‌های ایستگاهی است و پژوهش Zeraatpisheh و همکاران (۲۰۲۳) تجربی‌تر و مؤثر از ترکیب با مدل‌های رقومی ارتفاعی عمل می‌کند. همچنین، Kaya و Başayığit (۲۰۲۲) قدرت تفکیک مکانی متغیرهای اقلیمی را بر پیش‌بینی فسفر خاک بررسی کردند و گزارش کردند که قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متری دقت را حدود ۱۲ درصد افزایش می‌دهد. این یافته با پژوهش Safaei (۲۰۲۳) همخوانی دارد که تأثیر قدرت تفکیک مکانی در عمق‌های مختلف خاک را تحلیل کرده و نشان داده که قدرت تفکیک مکانی بالا در لایه‌های سطحی مؤثرتر است. در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، Garosi و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که ترکیب متغیرهای اقلیمی با قدرت تفکیک مکانی پایین‌تر (۱ کیلومتر) و توپوگرافی، دقت پیش‌بینی کربن آلی خاک را کاهش می‌دهد، زیرا الگوهای محلی بارش و تبخیر-تعرق به دلیل حساسیت به تغییرات خرداقلیمی ناکافی ثبت می‌شوند و قدرت تفکیک مکانی بالاتر برای ثبت دقیق این الگوها ضروری است.

بررسی مطالعات نشان می‌دهد که قدرت تفکیک مکانی متوسط (۵۰۰ تا ۱۰۰۰ متر) در مقیاس جهانی برای متغیرهای اقلیمی بهینه است، زیرا تعادل مناسبی بین دقت پیش‌بینی، حجم داده و هزینه محاسباتی برقرار می‌کند (Hijmans, 2017; Fick & Hengl et al., 2017). با این حال، در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران که الگوهای خرداقلیمی، تعاملات پیچیده اقلیم-توپوگرافی و تغییرات فصلی بارش و تبخیر و تعرق نقش تعیین‌کننده‌ای در فرآیندهای خاک‌سازی دارند، استفاده از قدرت تفکیک مکانی بالاتر (≥ 250 متر) دقت پیش‌بینی خواص خاک به‌ویژه کربن آلی را به‌طور معناداری بهبود می‌بخشد (Zeraatpisheh et al., 2023; Khosravani et al., 2024).

Hengl و همکاران (۲۰۱۷) در پروژه جهانی SoilGrids250m با استفاده از داده‌های اقلیمی WorldClim (با قدرت تفکیک مکانی حدود ۱ کیلومتر) و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، دقت پیش‌بینی خواص خاک مانند کربن آلی و بافت را در مقیاس جهانی بهبود بخشیدند و تأکید کردند که قدرت تفکیک مکانی اقلیمی بالا الگوهای محلی تغییرات دما و بارش را بهتر ثبت می‌کند که این امر روابط اقلیمی-ناهمواری را تقویت می‌نماید. در مقایسه، مطالعه‌ی Khosravani و همکاران (۲۰۲۴) در مناطق جنوب غربی ایران نشان داد که اندازه پیکسل متغیرهای محیطی، از جمله اقلیمی، بر دقت پیش‌بینی خواص خاک تأثیرگذار است. در این پژوهش اندازه پیکسل‌های مختلف (از ۳۰ متر تا ۱ کیلومتر)، مشخص شد که پیکسل‌های کوچکتر در ثبت تغییرات محلی اقلیمی و توپوگرافیکی مؤثرتر است، اما افزایش بیش از حد قدرت تفکیک مکانی می‌تواند منجر به نویز بیشتر و پیچیدگی محاسباتی شود، در حالی که قدرت تفکیک مکانی متوسط (مانند ۱۰۰-۵۰۰ متر) تعادل مناسبی بین دقت و کارایی فراهم می‌کند. همچنین، مطالعه‌ی Zeraatpisheh و همکاران (۲۰۲۳) در مناطق نیمه‌خشک ایران نشان داد که استفاده از قدرت تفکیک مکانی پایین‌تر (مانند ۱ کیلومتر) در متغیرهای اقلیمی، دقت پیش‌بینی ذخیره کربن آلی خاک را کاهش می‌دهد؛ زیرا الگوهای محلی بارش و تبخیر و تعرق به طور ناکافی ثبت می‌شوند و خطای هدفمند افزایش می‌یابد. تحلیل این مطالعات بیانگر آن است که قدرت تفکیک مکانی بالاتر در ثبت دقیق اقلیم‌های خرد و تعاملات پیچیده اقلیمی-توپوگرافیکی کارایی بیشتری دارد و به مدل‌سازی دقیق‌تر فرآیندهای خاک‌سازی کمک می‌کند. با این حال، محدودیت مشترک این پژوهش‌ها سوگیری درون‌یابی^{۱۹} ناشی از تراکم پایین ایستگاه‌های هواشناسی و عدم توجه کافی به تغییرات فصلی و پویایی اقلیمی است. این امر ضرورت بهره‌گیری از داده‌های اقلیمی پویا و زمان‌مند را در مناطق نیمه‌خشک و خشک برجسته می‌سازد تا دقت پیش‌بینی‌ها در چنین محیط‌های حساس بهبود یابد. مطالعات اخیر بر اهمیت قدرت تفکیک مکانی متغیرهای اقلیمی در مدل SCORPAN تأکید دارند. Lamichhane و همکاران (۲۰۱۹) در یک مرور هدفمند بر بیش از ۵۰ مطالعه، نشان دادند که متغیرهای اقلیمی با قدرت تفکیک مکانی متوسط (۵۰۰ تا ۱۰۰۰ متر) دقت نقشه‌برداری رقومی خاک را به‌ویژه در زیست‌بوم‌های خشک و نیمه‌خشک بهبود می‌بخشد، جایی که تغییرات اقلیمی محلی نقش تعیین‌کننده‌ای در توزیع خواص خاک ایفا می‌کنند. این مطالعه پیشنهاد می‌دهد که ادغام منابع چندگانه

¹⁹ Interpolation Bias

توپوگرافی) منجر به افزایش خطای نظام مند و کاهش قابلیت تعمیم پذیری مدل ها می شود؛ بنابراین، همسان سازی و انتخاب تطبیقی رزولوشن اقلیمی بر اساس نوع اکوسیستم و اهداف مدل ضروری است. روند پژوهشی به سمت بهره گیری از داده های اقلیمی پویا (زمان مند) گرایش یافته، هر چند شکاف دانشی در ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیمی بلندمدت بر توزیع خواص خاک همچنان باقی است.

جدول ۲ خلاصه ای از مطالعات کلیدی در این حوزه را ارائه می دهد و نشان می دهد که در مطالعات منطقه ای و محلی ایران، مقایسه رزولوشن های مختلف (از ۳۰ متر تا ۱ کیلومتر) انجام شده و عموماً رزولوشن های بالاتر در ثبت الگوهای محلی اقلیمی عملکرد بهتری داشته اند. تحلیل کلی حاکی از آن است که ناهمبستگی قدرت تفکیک مکانی بین متغیرهای اقلیمی و سایر متغیرها (به ویژه

جدول ۲- خلاصه مطالعات منتخب مربوط به متغیرهای اقلیمی و قدرت تفکیک مکانی آنها در نقشه برداری رقومی خاک

Table 2. Summary of selected studies on climatic covariates and their spatial resolution in digital soil mapping

| Study | Region / Scale | Climate Data Source | Spatial Resolution | Main Climatic Variables | Predicted Soil Properties | Validation Method | Soil Data Type |
|----------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|---|----------------------------|--------------------------|----------------------|
| Hengl et al. (2017) | Global | WorldClim | ~1 km | Temperature, Precipitation, Bioclimatic variables | SOC, Soil texture, pH, CEC | 10-fold cross-validation | Global soil profiles |
| Zeraatpisheh et al. (2023) | Semi-arid Iran (Regional) | WorldClim + Local data | 1 km & Multiple resolutions | Precipitation, Temperature, Evapotranspiration | Soil Organic Carbon stock | Independent validation | Field sampling |
| Khosravani et al. (2024) | Southwest Iran (Local-Regional) | Multiple sources (WorldClim + Local) | 30 m to 1 km | Temperature, Precipitation, Evapotranspiration | pH, EC, SOC, Soil texture | k-fold cross-validation | Field samples |
| Garosi et al. (2022) | Semi-arid Iran | WorldClim | 1 km | Climatic variables | SOC | Cross-validation | Field sampling |
| Fick & Hijmans (2017) | Global | WorldClim 2 | 1 km | Temperature, Precipitation, Radiation | (Base dataset) | - | - |
| Kaya & Başayığıt (2022) | Regional (Turkiye) | Climatic datasets | 500 m | Climatic variables | Soil Phosphorus (P) | Cross-validation | Field sampling |

پیش بینی کننده های قوی برای خواص خاک، به ویژه کربن آلی، مواد مغذی و بافت خاک، به کار می روند، زیرا نشان دهنده میزان تولید زیست توده، فعالیت زیستی و تأثیرات فصلی بر خاک هستند (Lamichhane et al., 2019; Khosravani et al., 2024).

پژوهش های اولیه در این حوزه با معرفی شاخص NDVI توسط Tucker (۱۹۷۹) آغاز شد که نشان داد این شاخص می تواند پوشش گیاهی را به طور مؤثر توصیف کند، هر چند محدود به داده های اولیه سنجش از دور بود. Huete و همکاران (۲۰۰۲) با معرفی شاخص EVI، دقت نتایج را نسبت به تغییرات فصلی افزایش دادند و محدودیت های NDVI در مناطق با پوشش گیاهی متراکم را برطرف کردند. هر دو مطالعه بر سنجش از دور تمرکز داشتند، اما EVI به دلیل کاهش نویز اتمسفری و خاک، دقت بیشتری ارائه می دهد. مطالعات اخیر نشان دهنده پیشرفت های قابل توجه در بهره گیری از قدرت تفکیک مکانی بالا هستند. Lamichhane و همکاران (۲۰۱۹) گزارش کردند که شاخص های پوشش گیاهی با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متری (مانند سنتینل-۲) دقت پیش بینی کربن آلی خاک را تا ۲۵ درصد بهبود می بخشد، زیرا تغییرات فصلی و

متغیرهای موجودات زنده، پوشش گیاهی و متغیرهای سنجش از دور

در مدل مفهومی SCORPAN، موجودات زنده به مجموعه عوامل زیستی اشاره دارد که بر فرآیندهای خاک سازی تأثیر می گذارند. این عوامل شامل پوشش گیاهی، فعالیت ریزجانداران، جانوران خاکی و تأثیرات انسانی (مانند کشاورزی و کاربری زمین) هستند (McBratney et al., 2003). موجودات زنده از طریق تولید مواد آلی، تجزیه بقایای گیاهی و جانوری، تثبیت نیتروژن و تغییر ساختار خاک نقش کلیدی در توزیع و تحول خواص خاک ایفا می کنند. در عمل، پوشش گیاهی به دلیل دسترسی آسان به داده های سنجش از دور، مهم ترین نماینده این عامل در نقشه برداری رقومی خاک است (Lamichhane et al., 2019). شاخص های پوشش گیاهی متنوع مانند تفاوت نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI)، شاخص بهبود یافته پوشش گیاهی (EVI)، شاخص سطح برگ (LAI)، شاخص های زیست توده (برای برآورد میزان زیست توده گیاهی و تولید مواد آلی در خاک)، نوارهای طیفی ماهواره های مختلف مانند لندست، سنتینل، مادیس و تصاویر فراطیفی به عنوان

"موجودات زنده" مدل SCORPAN، نه تنها به بهبود محلی نقشه‌برداری محدود نمی‌شود، بلکه پایه‌ای برای مدل‌سازی پایدار اکوسیستم‌ها و سیاست‌گذاری‌های مبتنی بر شواهد در مواجهه با تغییرات اقلیمی و فشارهای انسانی فراهم می‌کند.

متغیرهای مواد مادری و زمین‌شناسی

در مدل مفهومی SCORPAN، عامل «مواد مادری» به منبع اولیه مواد تشکیل‌دهنده خاک اشاره دارد و نقش تعیین‌کننده‌ای در شیمی، بافت، ظرفیت نگهداری آب و فرآیندهای اولیه هوازگی خاک ایفا می‌کند. این عامل شامل انواع سنگ مادر، ترکیبات معدنی، داده‌های ژئوشیمیایی و ویژگی‌های سنگ‌شناسی است. این متغیرها پایه‌ای برای خواص شیمیایی و فیزیکی خاک فراهم می‌کنند و در مناطق با تنوع سنگی بالا (مانند مناطق آتشفشانی و رسوبی) نقش کلیدی در نقشه‌برداری رقومی خاک دارند. مطالعات نشان می‌دهند که قدرت تفکیک مکانی متغیرهای مواد مادری تأثیر مستقیم بر دقت پیش‌بینی خواص خاک دارد، به‌ویژه در مناطقی که شیمی خاک به شدت به ترکیب سنگ مادر وابسته است. Bui و همکاران (۲۰۰۶) در استرالیا نشان دادند که نقشه‌های سنگ‌شناسی با قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰ متری، دقت پیش‌بینی ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) را تا ۲۰ درصد بهبود می‌بخشد، زیرا روابط ژئوشیمیایی را دقیق‌تر توصیف می‌کند. با این حال، این مطالعه به دلیل تمرکز بر داده‌های قدیمی و محدود به یک منطقه خاص، قابلیت تعمیم‌پذیری کمتری دارد. در مقایسه، Rosseel و همکاران (۲۰۱۵) در استرالیا با استفاده از قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متری برای مواد مادری، ضریب تعیین ۰/۷۰ را گزارش کردند. این پژوهش با تمرکز بر نقشه‌برداری سه‌بعدی، پیشرفت قابل توجهی نسبت به مطالعه قبلی نشان می‌دهد و بر اهمیت ادغام مواد مادری با سایر پارامترهای مدل SCORPAN تأکید دارد. Gibson و همکاران (۲۰۲۱) در ایالات متحده، قدرت تفکیک مکانی متغیرهای زمین‌شناسی را بهینه‌سازی کردند و دقت پیش‌بینی pH خاک را تا ۸۰ درصد افزایش دادند. این مطالعه کاربردی‌تر است و بر تعادل بین قدرت تفکیک مکانی و هزینه محاسباتی تمرکز دارد. با این حال، Nussbaum و همکاران (۲۰۱۸) با بررسی متغیرهای محیطی نامعتبر، نشان دادند که داده‌های ناقص یا قدرت تفکیک مکانی نامناسب ماده مادری، دقت کلی را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد و نیاز به اعتبارسنجی دقیق را برجسته می‌کند. Fan و همکاران (۲۰۲۲) نیز با رویکرد شباهت محدوده‌های جغرافیایی، متغیرهای زمین‌شناسی را کلیدی دانستند و تأکید کردند که قدرت تفکیک مکانی متوسط (۹۰ تا ۱۰۰ متر) در بسیاری از

محل را بهتر ثبت می‌کند. این مطالعه با پوشش گسترده خود، نقطه قوت عمده‌ای دارد، اما عدم تحلیل عمیق مدل‌های خاص، ضعف آن است. Khosravani و همکاران (۲۰۲۴) با ترکیب NDVI و EVI در قدرت تفکیک مکانی بالا با مدل‌های رقومی ارتفاعی، ضریب تعیین پیش‌بینی کربن آلی خاک را به ۰/۸۲ رساندند و نشان دادند که قدرت تفکیک مکانی پایین‌تر (مانند ۱ کیلومتر) در مناطق کشاورزی تا ۱۸ درصد خطا ایجاد می‌کند. یافته‌های این پژوهش بر تعاملات اقلیمی - توپوگرافیکی تأکید دارد. در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، پوشش گیاهی پراکنده و فصلی است و مطالعات Garosi و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متری لندست برای پیش‌بینی سیلت (ضریب تعیین ۰/۷۴) بهینه است. این مقایسه حاکی از آن است که قدرت تفکیک مکانی بالا برای ثبت تغییرات فصلی و پوشش کم ضروری است، در غیر این صورت دقت پیش‌بینی مواد آلی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

بررسی مطالعات نشان می‌دهد که قدرت تفکیک مکانی بالا (۱۰ تا ۳۰ متر) در ثبت تغییرات محلی و فصلی پوشش گیاهی، دقت پیش‌بینی خواص خاک، به ویژه کربن آلی و مواد مغذی و بافت را به طور معناداری افزایش می‌دهد. این افزایش دقت ناشی از توانایی بهتر در شناسایی الگوهای میکروتوپوگرافیکی، تغییرات فصلی زیست‌توده و تعاملات پیچیده بین موجودات زنده و توپوگرافی است که در قدرت تفکیک مکانی پایین‌تر (مانند ۱۰۰ متر یا بیشتر) به دلیل صاف‌سازی بیش از حد و از دست رفتن جزئیات محلی، منجر به خطای نظام‌دار و کاهش قابلیت تعمیم‌پذیری مدل‌ها می‌شود. در اکوسیستم‌های متنوع، به ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک، جایی که پوشش گیاهی پراکنده و فصلی است، قدرت تفکیک مکانی بالا امکان تشخیص دقیق‌تر تأثیرات محلی (مانند پوشش گیاهی محدود در دره‌ها یا تپه‌ها) را فراهم می‌کند و به کاهش عدم قطعیت مدل‌ها کمک می‌نماید.

با این حال، اهمیت قدرت تفکیک مکانی در این بخش محدود به افزایش دقت عددی نیست. این عامل به عنوان ابزاری کلیدی برای کاهش عدم قطعیت مدل‌ها، افزایش قابلیت تعمیم‌پذیری و حمایت از سیاست‌گذاری‌های زیست‌محیطی و کشاورزی پایدار عمل می‌کند. در مناطق حساس مانند ایران، انتخاب قدرت تفکیک مکانی مناسب باید بر اساس پیچیدگی اکوسیستم، اهداف مدل و محدودیت‌های محاسباتی انجام شود. قدرت تفکیک مکانی بسیار بالا ممکن است نویز را افزایش دهد، در حالی که قدرت تفکیک مکانی پایین جزئیات حیاتی را از دست می‌دهد. در نهایت، قدرت تفکیک مکانی در پارامتر

تحلیل مطالعات نشان می‌دهد که قدرت تفکیک مکانی متوسط (۹۰ تا ۱۰۰ متر) در بسیاری از موارد کافی است، اما در مناطق با تنوع سنگ‌شناسی بالا یا فرآیندهای پیچیده، ادغام داده‌های با رزولوشن بالاتر ضروری است.

متغیرهای سن خاک و موقعیت مکانی

در مدل مفهومی SCORPAN، دو عامل سن خاک و موقعیت مکانی نقش مکمل و حیاتی در توصیف توزیع مکانی خواص خاک ایفا می‌کنند. عامل سن خاک به زمان و تاریخچه تحول خاک اشاره دارد و فرآیندهای طولانی‌مدت پدوژنیک مانند هوازدگی، رسوب‌گذاری و تجمع مواد آلی را پوشش می‌دهد، در حالی که عامل موقعیت مکانی بر الگوهای فضایی و روابط همسایگی تأکید دارد و امکان مدل‌سازی فضایی را فراهم می‌آورد. متغیرهای مرتبط با سن خاک عمدتاً شامل شاخص‌های زمانی و متغیرهای تاریخی هستند که سن زمین‌شناسی یا دوره‌های رسوب‌گذاری، تاریخ کاربری زمین (شامل تغییرات زمانی مانند تبدیل جنگل به کشاورزی یا شهری سازی) و متغیرهایی مانند عمق کربنات‌شدن، عمق لایه‌های پدوژنیک (مانند لایه گچ‌دار) و شاخص‌های پالتوسول را در بر می‌گیرند. این متغیرها فرآیندهای طولانی‌مدت تحول خاک را توصیف می‌کنند و در مناطقی با تاریخچه زمین‌شناسی پیچیده (مانند فلات‌های قدیمی یا مناطق پساتکتونیک) نقش کلیدی دارند.

متغیرهای موقعیت مکانی نیز شامل مختصات مکانی (جغرافیایی یا متریک)، فاصله از ویژگی‌های جغرافیایی (مانند فاصله از رودخانه‌ها، جاده‌ها، خطوط گسل یا مراکز شهری)، نقشه‌های کاربری زمین و پوشش زمین با قدرت تفکیک مکانی متنوع و شاخص‌های فضایی پیشرفته مانند خروجی‌های مدل‌های پارامتریک یا غیرپارامتریک مانند یادگیری ماشین برای مدل‌سازی هستند. این متغیرها امکان ثبت الگوهای فضایی و روابط همسایگی را فراهم می‌کنند و در مدل‌های هیبرید (مانند Regression Kriging) نقش محوری دارند.

مطالعات نشان می‌دهند که ادغام این دو عامل دقت نقشه‌برداری رقومی خاک را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد، زیرا سن خاک روندهای طولانی‌مدت و موقعیت مکانی الگوهای کوتاه‌مدت را توصیف می‌کنند. Piedallu و همکاران (۲۰۲۲) در فرانسه نشان دادند که قدرت تفکیک مکانی بهینه برای نقشه‌های ویژگی‌های خاک بسته به وسعت جغرافیایی و مکان متفاوت است و استفاده از متغیرهای موقعیت مکانی (مانند فاصله از ویژگی‌ها) در مقیاس محلی دقت را بهبود می‌بخشد، اما در مقیاس بزرگ،

موارد کافی است، اما در مناطق با پیچیدگی ماده مادری، قدرت تفکیک مکانی بالاتر ضروری است. در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران که مواد مادری اغلب رسوبی یا آبرفتی هستند و شور شدن و فرسایش غالب است، Zeraatpisheh و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که قدرت تفکیک مکانی متوسط برای نقشه‌های زمین‌شناسی کافی است، اما ترکیب آن با قدرت تفکیک مکانی بالاتر توپوگرافی، دقت را در شرایط شور شدن افزایش می‌دهد. این یافته با مطالعات جهانی همخوانی دارد و بر اهمیت ادغام مواد والدی با سایر عوامل SCORPAN (مانند توپوگرافی و اقلیم) تأکید می‌کند (Hengle et al., 2018; Nussbaum et al., 2018; Kasraei et al., 2024). در واقع، ادغام متغیرهای مواد مادری با عوامل توپوگرافی و اقلیمی نه تنها دقت پیش‌بینی خواص خاک را افزایش می‌دهد، بلکه قابلیت تعمیم‌پذیری مدل‌ها را در اکوسیستم‌های متنوع، به ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک، بهبود می‌بخشد. این رویکرد چندعاملی، خطاهای ناشی از تک‌بعدی بودن را کاهش می‌دهد و به درک جامع‌تری از فرآیندهای خاک‌سازی منجر می‌شود.

متغیرهای مواد مادری پایه‌ای برای خواص شیمیایی و فیزیکی خاک هستند. نقشه‌های زمین‌شناسی سنتی معمولاً به صورت پلی‌گونال و در مقیاس‌های ۱:۲۵۰۰۰ تا ۱:۱۰۰۰۰۰۰ تهیه می‌شوند. مطالعات نشان می‌دهد که مقیاس نقشه زمین‌شناسی تأثیر قابل توجهی بر دقت پیش‌بینی دارد. نقشه‌های با مقیاس دقیق‌تر (مانند ۱:۲۵۰۰۰) جزئیات بیشتری ارائه می‌دهند، اما در مناطق با تنوع لیتولوژیکی بالا، حتی این مقیاس‌ها ممکن است ناکافی باشند (Bui et al., 2006; Nussbaum et al., 2018). در سال‌های اخیر، استفاده از داده‌های سنجش از دور (مانند تصاویر ماهواره Sentinel-2) برای استخراج شاخص‌های مواد مادری (مانند شاخص‌های معدنی و لیتولوژیکی) در رزولوشن‌های ۱۰ تا ۲۰ متر، دقت نقشه‌برداری رقومی خاک، به‌ویژه در پیش‌بینی pH، CEC و عناصر غذایی را به‌طور معناداری بهبود بخشیده است (Fan et al., 2022). همچنین، داده‌های رادیومتری (گاما-رادیومتری) که غلظت پتاسیم، اورانیوم و توریم را اندازه‌گیری می‌کنند، اطلاعات ارزشمندی در مورد ترکیب معدنی مواد مادری و بافت خاک فراهم می‌کنند و به‌عنوان متغیرهای قدرتمند در مدل‌های DSM عمل می‌کنند (O'Leary et al., 2022; Richer-de-Forges et al., 2023). در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران که مواد مادری اغلب رسوبی یا آبرفتی هستند و پدیده شور شدن غالب است، ترکیب نقشه‌های زمین‌شناسی سنتی با داده‌های سنجش از دور و رادیومتری (در رزولوشن بالاتر) دقت پیش‌بینی را افزایش می‌دهد (Zeraatpisheh et al., 2023).

مطالعات بیانگر این مطلب هستند که در اکوسیستم‌های پیچیده، مانند مناطق خشک و نیمه‌خشک، عامل سن خاک برای مدل‌سازی فرآیندهای کند هوازدگی و تجمع لایه‌های تشخیصی (مانند لایه‌های کربناته یا گچی) حیاتی است، در حالی که موقعیت مکانی برای ثبت تأثیرات انسانی (مانند تغییرات کاربری زمین) و الگوهای فضایی فرسایش یا شور شدن ضروری است. این ادغام نه تنها خطاهای نظام‌دار ناشی از تک‌بعدی بودن مدل‌ها را کاهش می‌دهد، بلکه قابلیت تفسیر مدل‌ها را افزایش می‌دهد و به درک بهتر تعاملات زمانی - مکانی در خاک‌سازی کمک می‌کند. با این حال، چالش‌های اصلی شامل کمبود داده‌های تاریخی دقیق برای متغیرهای سن (مانند سری‌های زمانی طولانی کاربری زمین)، محدودیت‌های قدرت تفکیک مکانی نقشه‌های کاربری و پوشش زمین (اغلب ۳۰۰ متر یا پایین‌تر) و پیچیدگی محاسباتی در مدل‌سازی فضایی است که می‌تواند منجر به بیش‌برازش یا افزایش خطا شود. فرصت‌های پیش رو شامل بهره‌گیری از داده‌های پویای سنجش از دور مانند سری‌های زمانی تصاویر ماهواره‌ای، ادغام با مدل‌های یادگیری عمیق برای استخراج ویژگی‌های فضایی - زمانی و استفاده از پایگاه‌های داده جهانی مانند SoilGrids برای پر کردن شکاف‌های داده‌ای است. این رویکردها می‌توانند دقت محلی را در مناطق حساس افزایش دهند و پایه‌ای محکم برای سیاست‌گذاری‌های مدیریت پایدار خاک، مقابله با تخریب و تغییرات اقلیمی فراهم کنند. در نهایت، این دو متغیر نه‌تنها مکمل سایر اجزای مدل SCORPAN هستند، بلکه ضرورت‌گذار از مدل‌های ایستا به مدل‌های دینامیک زمانی - مکانی را برجسته می‌سازند تا نقشه‌برداری رقومی خاک به ابزاری کارآمدتر برای چالش‌های جهانی تبدیل شود.

پیشرفت‌های اخیر در یادگیری ماشین و رویکردهای چندمقیاسی در نقشه‌برداری رقومی خاک

در سال‌های اخیر پیشرفت‌های چشم‌گیری در کاربرد یادگیری عمیق و رویکردهای چندمقیاسی برای نقشه‌برداری رقومی خاک مشاهده شده است. این پیشرفت‌ها نه تنها دقت پیش‌بینی خواص خاک مانند کربن آلی خاک، بافت خاک و رطوبت را افزایش داده‌اند، بلکه چالش‌های کلیدی مانند ناهماهنگی مقیاس متغیرهای محیطی، بیش‌برازش در قدرت تفکیک مکانی بالا و کمبود داده‌های برجسب‌دار^{۲۱} را به‌طور مؤثری مدیریت می‌کنند (Bohn and Miller, 2025). برخلاف مدل‌های سنتی مانند جنگل تصادفی یا

متغیرهای سن خاک (مانند تاریخ کاربری) غالب هستند. Chen و همکاران (۲۰۲۲) با مدل‌های هیبرید، مانند ترکیب کریجینگ و جنگل تصادفی، نشان دادند که ادغام مختصات جغرافیایی و شاخص‌های فضایی، دقت پیش‌بینی خواص خاک را در مقیاس وسیع افزایش می‌دهد و خطای باقی‌مانده را کاهش می‌دهد. Zhu و همکاران (۲۰۰۱) با رویکرد منطق فازی بر نقش متغیرهای سن مانند عمق کربناته‌شدن تأکید کردند، اما مطالعات جدیدتر مانند Nussbaum و همکاران (۲۰۱۸) با بررسی مجموعه بزرگ متغیرهای محیطی، نشان دادند که عامل موقعیت مکانی که اغلب از طریق نقشه‌های کاربری زمین و پوشش‌زمین با قدرت تفکیک مکانی متنوع یا شاخص‌های فضایی دیگر مدل‌سازی می‌شود، در مدل‌های یادگیری ماشین کلیدی است و عدم توجه به آن دقت پیش‌بینی را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. برای مثال، Zeraatpisheh و همکاران (۲۰۲۳) در مناطق نیمه‌خشک ایران با استفاده از متغیرهای سن مانند عمق کربناته‌شدن و سن رسوبی، نشان دادند که ادغام این متغیرها با قدرت تفکیک مکانی متوسط (۲۰ تا ۵۰ متر) دقت پیش‌بینی ذخیره کربن آلی خاک را تا ۱۵ درصد بهبود می‌بخشد، زیرا فرآیندهای طولانی‌مدت تجمع کربن در خاک‌های قدیمی‌تر را دقیق‌تر مدل‌سازی می‌کند. Khosravani و همکاران (۲۰۲۴) در جنوب غربی ایران نیز با بررسی تاریخ کاربری زمین به عنوان متغیر سن، گزارش کردند که این متغیر در ترکیب با توپوگرافی، خطای پیش‌بینی خواص شیمیایی خاک (مانند pH و هدایت الکتریکی) را کاهش می‌دهد، به ویژه در خاک‌های آبرفتی نیمه‌خشک که تغییرات تاریخی کاربری (مانند کشاورزی سنتی) شور شدن را تشدید کرده است.

در مناطق خشک و نیمه‌خشک نرخ هوازدگی پایین و تأثیرات تاریخی (مانند رسوب‌گذاری و فرسایش) غالب است. بررسی‌ها نشان می‌دهند که متغیرهای سن (مانند سن زمین‌شناسی، عمق کربناته‌شدن و تاریخ کاربری زمین) در این مناطق حساس، دقت مدل‌های نقشه‌برداری رقومی خاک را افزایش می‌دهند، زیرا الگوهای فضایی - زمانی را بهتر توصیف می‌کنند. همچنین، Kasraei و همکاران (۲۰۲۴) در یک مطالعه نظری-کاربردی، اهمیت متغیرهای سن مانند سن زمین‌شناسی را در بهینه‌سازی متغیرهای محیطی برای نقشه‌برداری خاک در مناطق خشک برجسته کردند و نشان دادند که عدم توجه به عامل سن منجر به افزایش واریانس تبیین نشده^{۲۰} بین ۱۰ تا ۲۰ درصد می‌شود. این

20 - Unexplained Variance

21 Labeled data

باید بر مدل‌های سبک‌تر هیبرید و ادغام فیزیک محور تمرکز کند. در نهایت، این رویکردها نه تنها دقت محلی را در مناطق پیچیده مانند مناطق نیمه‌خشک ارتقا می‌دهند، بلکه به سمت نقشه‌برداری رقومی پویا، سه‌بعدی و پایدار حرکت می‌کنند که با اهداف جهانی مانند ذخیره کربن خاک و کشاورزی دقیق همخوانی دارد.

هرچند تمرکز این مرور بر مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران ناشی از حساسیت بالای این اکوسیستم‌ها به قدرت تفکیک مکانی متغیرهای محیطی به دلیل الگوهای خرداقلیمی، پوشش گیاهی پراکنده و فرآیندهای فرسایشی است، مطالعات در اکوسیستم‌های مرطوب، معتدل و دشت‌های کم ارتفاع نشان می‌دهند که توصیه‌های قدرت تفکیک مکانی اغلب متفاوت است. برای مثال، در مناطق دشت‌های کم ارتفاع با توپوگرافی ملایم، مانند دشت‌های کشاورزی اروپا یا کانادا، قدرت تفکیک مکانی متوسط تا پایین متغیرهای رقومی ارتفاعی (۳۰ تا ۹۰ متر) اغلب کافی است و قدرت تفکیک مکانی بسیار بالا ممکن است منجر به نویز یا بیش برآزش شود، زیرا تغییرات میکروتوپوگرافی کمتر غالب هستند (Adeniyi et al., 2024). در مقابل، در اکوسیستم‌های مرطوب یا جنگلی (مانند مناطق معتدل اروپا یا آمریکای شمالی)، متغیرهای سنجش از دور با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ تا ۳۰ متر برای ثبت تغییرات پوشش گیاهی متراکم مفیدتر عمل می‌کنند، اما نیاز به قدرت تفکیک مکانی بسیار بالا برای توپوگرافی کمتر است (Stumpf et al., 2024). این مقایسه نشان می‌دهد که انتخاب قدرت تفکیک مکانی باید تطبیقی و وابسته به پیچیدگی چشم‌انداز باشد.

بحث و تحلیل یافته‌ها

نقشه‌برداری رقومی خاک به عنوان یک رویکرد داده محور و مبتنی بر مدل‌های آماری و یادگیری ماشین، وابستگی شدیدی به کیفیت و ویژگی‌های متغیرهای محیطی دارد. در میان این ویژگی‌ها، قدرت تفکیک مکانی یکی از عوامل تعیین‌کننده در دقت، قابلیت تعمیم‌پذیری و تفسیرپذیری مدل‌ها است. قدرت تفکیک مکانی نه تنها بر ثبت جزئیات محلی الگوهای خاک‌سازی تأثیر می‌گذارد، بلکه بر تعادل بین دقت پیش‌بینی، حجم داده، هزینه محاسباتی و کارایی عملی مدل‌ها نیز نقش کلیدی ایفا می‌کند. بررسی مطالعات نشان می‌دهد که انتخاب نادرست قدرت تفکیک مکانی می‌تواند منجر به خطاهای نظام‌دار، صاف‌سازی بیش از حد،

که اغلب بر متغیرهای تک‌مقیاسی یا نقطه‌ای تمرکز دارند، مدل‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی پیچشی، ResNet و Transformer امکان استخراج سلسله‌مراتبی ویژگی‌های چندمقیاسی را مستقیماً از داده‌های رستری فراهم می‌آورند و روابط غیرخطی پیچیده را در مقیاس‌های محلی تا جهانی بهتر مدل‌سازی می‌کنند (Reddy and Gopinath, 2025). بررسی مطالعات نشان می‌دهد که شبکه‌های عصبی پیچشی چندمقیاسی و هیبرید عملکرد برتر نسبت به مدل‌های سنتی دارند. برای مثال، مدل‌های مبتنی بر ResNet با مکانیسم‌های attention یا Transformer (مانند Swin Transformer) ویژگی‌های محلی (micro-patterns) و جهانی (macro-patterns) را هم‌زمان استخراج می‌کنند و دقت پیش‌بینی بافت خاک را در اکوسیستم‌های ناهمگن به‌طور معنادار افزایش می‌دهند، در حالی که نویز ناشی از ناهماهنگی مقیاس را کاهش می‌دهند (Reddy and Gopinath, 2025). همچنین، مدل‌های شبکه عصبی پیچشی سه بعدی برای نقشه‌برداری سه‌بعدی خواص خاک (مانند توزیع ذرات در عمق) توسعه یافته‌اند که روابط عمودی-افقی را به‌طور هم‌زمان مدل‌سازی کرده و خطاهای نظام‌دار ناشی از ساده‌سازی لایه‌های عمقی را کاهش می‌دهند (Ließ and Sakhaee, 2024).

در حوزه متغیرهای زمانی، ادغام QRF با سری‌های زمانی سنجش از دور مانند Sentinel-2 عدم قطعیت را از طریق توزیع چندک‌ها مدیریت کرده و پیش‌بینی کربن آلی خاک را در دوره‌های چندساله، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که تغییرات فصلی غالب است، بهبود می‌بخشد (Tian et al., 2025). علاوه بر این، رویکردهای یادگیری خودنظارتی (SSL) مبتنی بر Transformer مانند SSL-SoilNet با بهره‌گیری از داده‌های بدون برچسب، قابلیت تعمیم‌پذیری مدل‌ها را در مقیاس بزرگ افزایش داده و عملکرد را نسبت به روش‌های نظارت‌شده سنتی برتر ساخته‌اند (Kakhani et al., 2024). از منظر تحلیلی، این پیشرفت‌ها چالش‌های سنتی نقشه برداری رقومی خاک را به‌طور اساسی تغییر می‌دهند. مدل‌های چندمقیاسی ناهماهنگی مقیاس را از طریق استخراج پویا ویژگی‌ها برطرف می‌کنند، در حالی که رویکردهای یادگیری خودنظارتی نیاز به داده‌های برچسب‌دار حجیم را کاهش می‌دهد و مدل‌ها را در برابر نویز و صاف‌سازی بیش از حد مقاوم‌تر می‌سازد. با این حال، چالش‌هایی مانند هزینه محاسباتی بالا و نیاز به داده‌های آموزشی بزرگ همچنان وجود دارد که تحقیقات آینده

²² Quantile Regression Forest

²³ Self-Supervised Learning

در بسیاری از مطالعات، حتی زمانی که متغیرهای محیطی با رزولوشن بالا استفاده می‌شوند، اگر تراکم مشاهدات صحرایی ناکافی باشد (به‌ویژه در مقیاس‌های وسیع یا مناطق ناهموار و دورافتاده)، مدل‌ها قادر به یادگیری الگوهای پیچیده محلی نخواهند بود و خطای تعمیم‌پذیری افزایش می‌یابد. این مسئله در ایران، به دلیل گستردگی مناطق خشک و نیمه‌خشک و دشواری نمونه‌برداری، اهمیت دوچندان پیدا می‌کند؛ بنابراین، بهینه‌سازی همزمان قدرت تفکیک مکانی متغیرهای محیطی با طراحی مناسب طرح ضروری است تا بتوان اثر واقعی قدرت تفکیک مکانی متغیرهای محیطی را به درستی ارزیابی کرد.

قدرت تفکیک مکانی پایین اغلب باعث صاف‌سازی بیش از حد الگوهای محلی و کاهش واریانس واقعی می‌شود، در حالی که قدرت تفکیک مکانی بسیار بالا می‌تواند منجر به نویز و بیش‌برازش، به‌ویژه در مدل‌های پیچیده یادگیری ماشین، شود (Piikki et al., 2021)؛ بنابراین ارزیابی عدم قطعیت و شناسایی خطاهای مقیاسی امری ضروری است و اعتبار سنجی بایستی با داده‌های مستقل در قدرت تفکیک‌های مکانی مختلف انجام شود تا تأثیر نویز و صاف‌سازی بیش از حد ارزیابی شود.

از سوی دیگر، فرصت‌های پیش رو شامل پیشرفت‌های فناوری سنجش از دور (مانند Sentinel-2 با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متری، TanDEM-X برای DEM های دقیق و داده‌های پهپادی) و الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند مدل‌های چندمقیاسی است که امکان بهینه‌سازی پویای قدرت تفکیک مکانی را فراهم می‌کنند. این پیشرفت‌ها توانمندی کاربران، از پژوهشگران خاک‌شناسی تا مدیران منابع طبیعی و سیاست‌گذاران را افزایش می‌دهد و امکان تولید نقشه‌های خاک با دقت محلی در مقیاس جهانی را میسر می‌سازد. کاربران با دسترسی به پلتفرم‌های ابری مانند گوگل ارث انجین می‌توانند داده‌های با قدرت تفکیک مکانی متنوع را ادغام کنند و مدل‌های ترکیبی بسازند که هم دقت محلی و هم کارایی جهانی را داشته باشند. در نهایت، قدرت تفکیک مکانی به عنوان یک پارامتر بنیادین در نقشه برداری رقومی خاک، فراتر از یک ویژگی فنی، به عنوان پلی بین مقیاس‌های خرد و کلان عمل می‌کند و بر کیفیت تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر خاک تأثیر مستقیم دارد. انتخاب بهینه این پارامتر نه تنها دقت علمی مدل‌ها را تضمین می‌کند، بلکه به مدیریت پایدار منابع خاک، مقابله با تغییرات اقلیمی و امنیت غذایی کمک می‌نماید. با توجه به چالش‌های موجود، روند پژوهشی باید به سمت رویکردهای تطبیقی و چندمقیاسی گرایش یابد تا شکاف‌های فعلی پر شود و نقشه برداری رقومی خاک به ابزاری کارآمدتر برای

از دست رفتن جزئیات خرد مقیاس و افزایش واریانس تبیین نشده شود که این امر دقت کلی مدل‌های تهیه نقشه رقومی خاک را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. اهمیت قدرت تفکیک مکانی از جنبه‌های متعدد ناشی می‌شود. نخست، در اکوسیستم‌های پیچیده و ناهمگن، مانند مناطق کوهستانی، نیمه‌خشک، قدرت تفکیک مکانی بالا امکان ثبت دقیق تغییرات محلی فرآیندهای خاک‌سازی مانند فرسایش، تجمع رسوبات، توزیع رطوبت و فعالیت بیولوژیکی را فراهم می‌کند. این دقت محلی برای کاربردهای عملی مانند مدیریت دقیق کشاورزی، ارزیابی ریسک فرسایش و مدل‌سازی ذخیره کربن خاک ضروری است؛ زیرا الگوهای خردمقیاس اغلب عامل غالب در توزیع خواص خاک هستند. دوم، در مقیاس‌های وسیع (منطقه‌ای یا جهانی)، قدرت تفکیک مکانی پایین‌تر تعادل مناسبی بین دقت کلی و کارایی محاسباتی برقرار می‌کند؛ زیرا حجم داده‌های حجیم را مدیریت‌پذیر می‌سازد و امکان پردازش در پلتفرم‌های ابری را فراهم می‌کند. با این حال، این رویکرد در مناطق با تنوع بالا می‌تواند منجر به بیش‌برازش شود و جزئیات کلیدی را از دست بدهد که این امر بر قابلیت اعتماد مدل‌های جهانی مانند تأثیر منفی می‌گذارد.

یکی از چالش‌های اصلی در نقشه‌برداری رقومی خاک، ناهماهنگی مقیاس بین متغیرهای محیطی با قدرت تفکیک مکانی متفاوت (مانند DEM ۱۰ متر در مقابل داده‌های اقلیمی با قدرت تفکیک مکانی یک کیلومتر) است که می‌تواند منجر به خطاهای نظام‌دار، کاهش دقت پیش‌بینی و افزایش عدم قطعیت شود (Newman et al., 2023). راه‌حل‌های عملی پیشنهادی شامل ریز مقیاس‌سازی یا درشت مقیاس‌سازی (مانند استفاده از هرم گوسی برای تجزیه و ترکیب مقیاس‌ها)، هماهنگ‌سازی داده‌ها مانند ادغام و همسان‌سازی اندازه پیکسل‌ها از طریق درون‌یابی یا میانگین‌وزنی و رویکردهای چندمقیاسی است که ویژگی‌های محلی و جهانی را همزمان استخراج می‌کنند و ناهماهنگی را کاهش می‌دهند (Radočaj et al., 2022; Tahmouresi et al., 2024).

علاوه بر ناهماهنگی مقیاس، یکی از محدودیت‌های مهم که اغلب با اثر قدرت تفکیک مکانی متغیرهای محیطی در هم تنیده است، تعداد، تراکم و طرح نمونه‌برداری مشاهدات صحرایی است. کاهش کارایی مدل‌ها را نمی‌توان صرفاً به رزولوشن متغیرهای کمکی نسبت داد، زیرا تراکم پایین نقاط نمونه‌برداری و طرح‌های نمونه‌برداری نامناسب نیز سهم قابل توجهی در افزایش عدم قطعیت و کاهش دقت پیش‌بینی دارند (Piedallu et al., 2022; Miller et al., 2022).

چالش‌های جهانی تبدیل گردد. در پایان بر اساس منابع مورد مطالعه و ارزیابی نتایج آنها (جدول ۳) تهیه گردید. در این جدول پیشنهادهای بهینه برای قدرت تفکیک مکانی ویژگی‌های مدل و ارزیابی نتایج آنها (جدول ۳) تهیه گردید. در این جدول SCORPAN در زیست‌بوم‌های مختلف ارائه شده است.

جدول ۳- توصیه‌های بهینه قدرت تفکیک مکانی عوامل مدل در اکوسیستم‌های مختلف

Table 1. Optimal Recommendations for the Spatial Resolution of SCORPAN Model Factors Across Different Ecosystems

| منابع Sources | توصیه قدرت تفکیک مکانی در مناطق مرطوب - معتدل (دشت‌های کم ارتفاع) Recommended Spatial Resolution in Humid-Temperate Regions (Lowland Plains) | توصیه قدرت تفکیک مکانی در مناطق خشک - نیمه‌خشک (کوهستانی - ناهموار) Recommended Spatial Resolution in Arid-Semi-Arid Regions (Mountainous-Undulating) | توضیح مختصر Brief description | پارامترهای مدل مفهومی اسکورپان CORPAN conceptual model component |
|--|---|--|---|--|
| Garosi et al., 2022; Zeraatpisheh et al., 2023 | ۹۰ تا ۲۵۰ متر (کافی برای لایه‌های سطحی) 90-250 m (adequate for surface layers) | نقطه‌ای یا ۳۰ تا ۹۰ متر (ادغام با DEM دارای قدرت تفکیک مکانی) Point or 30-90 m (integration with DEM having suitable spatial resolution) | داده‌های نقطه‌ای یا لایه‌های خاک قبلی Point soil data or previous soil layers | خواص خاک (S) Soil properties |
| Hengl et al., 2017; Lamichhane et al., 2019 | ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ متر (در مقیاس جهانی/ منطقه‌ای) 500-1000 m (regional/global scale) | ≥ ۲۵۰ متر (برای خرد اقلیم و تعاملات محلی) ≤ ۲۵۰ متر (for local microclimates and interactions) | بارش، دما، تبخیر Precipitation, temperature, evapotranspiration | اقلیم (C) Climate |
| Khosravani et al., 2024; Tziolas et al., 2024 | ۳۰ تا ۹۰ متر (برای پوشش متراکم) 30-90 m (for dense vegetation cover) | ۱۰ تا ۳۰ متر (برای پوشش پراکنده و فصلی) 10-30 m (for sparse and seasonal vegetation cover) | شاخص‌های گیاهی مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای Vegetation indices extracted from satellite imagery | موجودات زنده (O) Organisms |
| Smith et al., 2006; Cavazzi et al., 2013 | ۳۰ تا ۹۰ متر (در دشت‌ها، جلوگیری از بیش‌برازش) 30-90 m (in plains to avoid overfitting) | ۱ تا ۳۰ متر (برای شاخص‌های ژئومورفومتریک پیشرفته) 1-30 m (for advanced geomorphometric indices) | مشنقات حاصل از DEM Covariates derived from DEM | توپوگرافی (R) Relief |
| Heung et al., 2016; Nussbaum et al., 2018 | ۹۰ تا ۲۵۰ متر (کافی در مناطق یکنواخت) 90-250 m (adequate in homogeneous regions) | ۹۰ تا ۱۰۰ متر (ترکیب با توپوگرافی با قدرت تفکیک مکانی بالا در تنوع بالا) 90-100 m (combined with topography in high-diversity areas) | نقشه‌های سنگ‌شناسی Geological maps | مواد مادری - زمین شناسی (P) Parent materials |
| Piedallu et al., 2022 | ۹۰ تا ۲۵۰ متر (کمتر حساس) 90-250 m (less sensitive) | ۳۰ تا ۹۰ متر (ادغام با سری زمانی پوشش زمین) 30-90 m (integrated with time series of land cover) | تاریخ کاربری زمین، عمق لایه‌ها Landuse history, layer depth | سن (A) Age |
| Miller et al., 2022 | ۱۰۰ تا ۵۰۰ متر 100-500 m | وابسته به سایر عوامل (۱۰ تا ۱۰۰ متر) 10-100 m (depending on other factors) | مختصات، فاصله از ویژگی‌ها Coordinates, distance to features | موقعیت مکانی (N) Spatial position |

متغیرهای پوشش گیاهی (Sentinel-2) و DEM با دقت بالا توصیه می‌شود تا تغییرات میکروتوپوگرافی و الگوهای شور شدن به خوبی ثبت گردد (Khosravani et al., 2024). در مقیاس منطقه‌ای، رزولوشن ۳۰ تا ۹۰ متر برای متغیرهای توپوگرافی و بیش از ۲۵۰ متر برای متغیرهای اقلیمی تعادل مناسبی بین دقت و هزینه ایجاد می‌کند (Zeraatpisheh et al., 2023). در مقیاس ملی، رزولوشن ۲۵۰ تا ۵۰۰ متر برای داده‌های اقلیمی و ۹۰ متر برای مواد مادری عموماً کافی است (Hengl et al., 2017).

در مقابل، در کوهستان‌های شمال کشور (چشم‌انداز ناهموار، اقلیم مرطوب تا نیمه‌مرطوب با تنوع ارتفاعی و لیتولوژیکی

هرچند (جدول ۳) چارچوب کلی و مقایسه‌ای توصیه‌های قدرت تفکیک مکانی عوامل مدل SCORPAN را در دو دسته اصلی اکوسیستم (خشک-نیمه‌خشک در مقابل مرطوب-معتدل) ارائه می‌دهد، اما کاربرد عملی آن نیازمند تفسیر تطبیقی بر اساس شرایط منطقه‌ای، پیچیدگی چشم‌انداز و مقیاس مورد نظر است. انتخاب نهایی رزولوشن باید به صورت موردی و با در نظر گرفتن تعاملات محلی بین عوامل SCORPAN انجام شود.

برای مثال، در دشت‌های خوزستان (مناطق دشت‌های پایین دست با توپوگرافی ملایم، اقلیم خشک تا نیمه‌خشک و مواد مادری آبرفتی)، در مقیاس محلی، استفاده از رزولوشن ۱۰ تا ۳۰ متر برای

این مثال‌ها تأکید می‌کنند که (جدول ۳) یک چارچوب راهنما و تطبیقی است و نه یک تجویز مطلق. انتخاب قدرت تفکیک مکانی باید همواره بر اساس ارزیابی محلی پیچیدگی چشم‌انداز، اهداف نقشه‌برداری (دقت محلی در مقابل پوشش وسیع) و محدودیت‌های عملی (هزینه، حجم داده و ظرفیت محاسباتی) صورت گیرد (Lamichhane et al., 2019). چنین رویکردی، قابلیت تعمیم‌پذیری یافته‌ها را افزایش داده و امکان کاربرد عملی این جدول را در شرایط متنوع جغرافیایی ایران فراهم می‌سازد.

بالا)، در مقیاس محلی، رزولوشن بسیار بالا (۱ تا ۱۰ متر) برای DEM و شاخص‌های ژئومورفومتریک پیشرفته (مانند TWI و MrVBF) ضروری است (Cavazzi et al., 2013). در مقیاس منطقه‌ای، ترکیب قدرت تفکیک مکانی ۱۰ تا ۳۰ متر برای متغیرهای پستی و بلندی و پوشش گیاهی و ۲۵۰ متر برای اقلیم عملکرد بهتری نشان می‌دهد (Piedallu et al., 2022). در مقیاس ملی، رزولوشن ۳۰ تا ۹۰ متر برای متغیرهای توپوگرافی و ۵۰۰ متر برای متغیرهای اقلیمی تعادل مناسبی فراهم می‌کند (Miller et al., 2022).

References

- Adeniyi, O.D., Bature, H. and Mearker, M., 2024. A systematic review on digital soil mapping approaches in lowland areas. *Land*, 13(3), p.379.
- Bohn, M.P. and Miller, B.A., 2025. Digital soil mapping via machine learning of agronomic properties for the full soil profile at within-field resolution. *Agronomy Journal*, 117(5), p.e70144.
- Bohn, M.P. and Miller, B.A., 2025. Digital soil mapping via machine learning of agronomic properties for the full soil profile at within-field resolution. *Agronomy Journal*, 117(5), p.e70144.
- Bui, E.N., Henderson, B.L. and Viergever, K., 2006. Knowledge discovery from models of soil properties developed through data mining. *Ecological Modelling*, 191(3-4), pp.431-446.
- Cavazzi, S., Corstanje, R., Mayr, T., Hannam, J. and Fealy, R., 2013. Are fine resolution digital elevation models always the best choice in digital soil mapping?. *Geoderma*, 195, pp.111-121.
- Chen, S., Arrouays, D., Mulder, V.L., Poggio, L., Minasny, B., Roudier, P., Libohova, Z., Lagacherie, P., Shi, Z., Hannam, J. and Meersmans, J., 2022. Digital mapping of GlobalSoilMap soil properties at a broad scale: A review. *Geoderma*, 409, p.115567.
- Dai, W., Yang, X., Na, J., Li, J., Brus, D., Xiong, L., Tang, G. and Huang, X., 2019. Effects of DEM resolution on the accuracy of gully maps in loess hilly areas. *Catena*, 177, pp.114-125.
- Fan, N.Q., Zhao, F.H., Zhu, L.J., Qin, C.Z. and Zhu, A.X., 2022. Digital soil mapping with adaptive consideration of the applicability of environmental covariates over large areas. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 113, p.102986.
- Fick, S.E. and Hijmans, R.J., 2017. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology*, 37(12), pp.4302-4315.
- Florinsky, I.V. and Kuryakova, G.A., 2000. Determination of grid size for digital terrain modelling in landscape investigations—exemplified by soil moisture distribution at a micro-scale. *International Journal of Geographical Information Science*, 14(8), pp.815-832.
- Garosi, Y., Ayoubi, S., Nussbaum, M. and Sheklabadi, M., 2022. Effects of different sources and spatial resolutions of environmental covariates on predicting soil organic carbon using machine learning in a semi-arid region of Iran. *Geoderma Regional*, 29, p.e00513.
- Gibson, A.J., Hancock, G.R., Bretreger, D., Cox, T., Hughes, J. and Kunkel, V., 2021. Assessing digital elevation model resolution for soil organic carbon prediction. *Geoderma*, 398, p.115106.
- Grohmann, C.H., Smith, M.J. and Riccomini, C., 2010. Multiscale analysis of topographic surface roughness in the Midland Valley, Scotland. *IEEE Transactions on geoscience and Remote Sensing*, 49(4), pp.1200-1213.
- Guo, H., Liu, Z., Jiang, H., Wang, C., Liu, J. and Liang, D., 2017. Big Earth Data: A new challenge and opportunity for Digital Earth's development. *International Journal of Digital Earth*, 10(1), pp.1-12.
- Hengl, T., Mendes de Jesus, J., Heuvelink, G.B., Ruiperez Gonzalez, M., Kilibarda, M.,

- Blagotić, A., Shangguan, W., Wright, M.N., Geng, X., Bauer-Marschallinger, B. and Guevara, M.A., 2017. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLoS one*, 12(2), p.e0169748.
16. Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X. and Ferreira, L.G., 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote sensing of environment*, 83(1-2), pp.195-213.
 17. Kakhani, N., Rangzan, M., Jamali, A., Attarchi, S., Alavipanah, S.K., Mommert, M., Tziolas, N. and Scholten, T., 2024. SSL-SoilNet: A hybrid transformer-based framework with self-supervised learning for large-scale soil organic carbon prediction. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.
 18. Kasraei, B., Schmidt, M.G., Zhang, J., Bulmer, C.E., Filatow, D.S., Pennell, T. and Heung, B., 2024. A framework for optimizing environmental covariates to support model interpretability in digital soil mapping. *Geoderma*, 445, p.116873.
 19. Kaya, F. and Başayığıt, L., 2022, March. The effect of spatial resolution of environmental variables on the performance of machine learning models in digital mapping of soil phosphorus. In *2022 IEEE Mediterranean and Middle-East Geoscience and Remote Sensing Symposium (M2GARSS)* (pp. 169-172). IEEE.
 20. Khosravani, P., Baghernejad, M., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Mousavi, S.R., Moosavi, A.A., Fallah Shamsi, S.R., Shokati, H., Kebonye, N.M. and Scholten, T., 2024. Assessing the Role of Environmental Covariates and Pixel Size in Soil Property Prediction: A Comparative Study of Various Areas in Southwest Iran. *Land*, 13(8), p.1309.
 21. Lamichhane, S., Kumar, L. and Wilson, B., 2019. Digital soil mapping algorithms and covariates for soil organic carbon mapping and their implications: A review. *Geoderma*, 352, pp.395-413.
 22. Ließ, M. and Sakhæe, A., 2024. Deep Learning with a Multi-Task Convolutional Neural Network to Generate a National-Scale 3D Soil Data Product: The Particle Size Distribution of the German Agricultural Soil Landscape. *Agriculture*, 14(8), p.1230.
 23. McBratney, A.B., Santos, M.M. and Minasny, B., 2003. On digital soilmapping. *Geoderma*, 117(1-2), pp.3-52.
 24. Michalopoulou, M., Depountis, N., Nikolakopoulos, K. and Boumpoulis, V., 2022. The significance of digital elevation models in the calculation of LS factor and soil erosion. *Land*, 11(9), p.1592.
 25. Newman, D.R., Saurette, D.D., Cockburn, J.M., Dragut, L. and Lindsay, J.B., 2023. Assessing spatially heterogeneous scale representation with applied digital soil mapping. *Environmental Modelling & Software*, 160, p.105612.
 26. Nussbaum, M., Spiess, K., Baltensweiler, A., Grob, U., Keller, A., Greiner, L., Schaepman, M.E. and Papritz, A., 2018. Evaluation of digital soil mapping approaches with large sets of environmental covariates. *Soil*, 4(1), pp.1-22.
 27. Oldfield, E.E., Bradford, M.A. and Wood, S.A., 2019. Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields. *Soil*, 5(1), pp.15-32.
 28. O'Leary, D., Brown, C. and Daly, E., 2022. Digital soil mapping of peatland using airborne radiometric data and supervised machine learning—Implication for the assessment of carbon stock. *Geoderma*, 428, p.116086.
 29. Page, M.J., McKenzie, J.E., Bossuyt, P.M., Boutron, I., Hoffmann, T.C., Mulrow, C.D., Shamseer, L., Tetzlaff, J.M., Akl, E.A., Brennan, S.E. and Chou, R., 2021. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *bmj*, 372.
 30. Piedallu, C., Pedersoli, E., Chaste, E., Morneau, F., Seynave, I. and Gégout, J.C., 2022. Optimal resolution of soil properties maps varies according to their geographical extent and location. *Geoderma*, 412, p.115723.
 31. Piikki, K., Wetterlind, J., Söderström, M. and Stenberg, B., 2021. Perspectives on validation in digital soil mapping of continuous attributes—A review. *Soil Use and Management*, 37(1), pp.7-21.
 32. Preety, K., Prasad, A.K., Varma, A.K. and El-Askary, H., 2022. Accuracy assessment, comparative performance, and enhancement of public domain digital elevation models (ASTER 30 m, SRTM 30 m, CARTOSAT 30 m, SRTM 90 m, MERIT 90 m, and TanDEM-X 90 m) using DGPS. *Remote Sensing*, 14(6), p.1334.

33. Radočaj, D., Jurišić, M., Antonić, O., Šiljeg, A., Cukrov, N., Rapčan, I., Plaščak, I. and Gašparović, M., 2022. A multiscale cost-benefit analysis of digital soil mapping methods for sustainable land management. *Sustainability*, 14(19), p.12170.
34. Radočaj, D., Jurišić, M., Rapčan, I., Domazetović, F., Milošević, R. and Plaščak, I., 2023. An independent validation of SoilGrids accuracy for soil texture components in Croatia. *Land*, 12(5), p.1034.
35. Reddy, N.L. and Gopinath, M.P., 2025. Advanced deep learning framework for soil texture classification. *Scientific Reports*, 15(1), p.34407.
36. Richer-de-Forges, A.C., Chen, Q., Baghdadi, N., Chen, S., Gomez, C., Jacquemoud, S., Martelet, G., Mulder, V.L., Urbina-Salazar, D., Vaudour, E. and Weiss, M., 2023. Remote sensing data for digital soil mapping in French research—a review. *Remote Sensing*, 15(12), p.3070.
37. Rocha, J., Duarte, A., Fabres, S., Quintela, A. and Serpa, D., 2022. Influence of DEM resolution on the hydrological responses of a terraced catchment: An exploratory modelling approach. *Remote Sensing*, 15(1), p.169.
38. Rossel, R.V., Chen, C., Grundy, M.J., Searle, R., Clifford, D. and Campbell, P.H., 2015. The Australian three-dimensional soil grid: Australia's contribution to the GlobalSoilMap project. *Soil Research*, 53(8), pp.845-864.
39. Safaee, S., 2023. *Influence of Sample Density, Model Selection, Depth, Spatial Resolution, and Land Use on Prediction Accuracy of Soil Properties in Indiana, USA* (Doctoral dissertation, Purdue University).
40. Sediqi, A.S., Naseri, A.K. and Haidari, M.D., 2025. Digital soil mapping: Challenges and future prospects. *ESRJ*, 63(2), pp.61-67.
41. Setargie, T.A., Tsunekawa, A., Ayehu, N.H. and Tsubo, M., 2022, December. Effect of DEM Resolution on Soil Erosion Estimation and Gully Erosion Susceptibility Prediction. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 2022, pp. EP55C-0833).
42. Simbahan, G.C. and Dobermann, A., 2006. Sampling optimization based on secondary information and its utilization in soil carbon mapping. *Geoderma*, 133(3-4), pp.345-362.
43. Smith, M.P., Zhu, A.X., Burt, J.E. and Stiles, C., 2006. The effects of DEM resolution and neighborhood size on digital soil survey. *Geoderma*, 137(1-2), pp.58-69.
44. Stumpf, F., Behrens, T., Schmidt, K. and Keller, A., 2024. Exploiting soil and remote sensing data archives for 3D mapping of multiple soil properties at the Swiss national scale. *Remote Sensing*, 16(15), p.2712.
45. Taghizadeh-Mehrjardi, R., Minasny, B., Toomanian, N., Zeraatpisheh, M., Amirian-Chakan, A. and Triantafyllis, J., 2019. Digital mapping of soil classes using ensemble of models in Isfahan region, Iran. *Soil Systems*, 3(2), p.37.
46. Tahmouresi, M.S., Niksokhan, M.H. and Ehsani, A.H., 2024. Enhancing spatial resolution of satellite soil moisture data through stacking ensemble learning techniques. *Scientific Reports*, 14(1), p.25454.
47. Thompson, J.A., Bell, J.C. and Butler, C.A., 2001. Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling. *Geoderma*, 100(1-2), pp.67-89.
48. Tian, X., de Bruin, S., Simoes, R., Isik, M.S., Minarik, R., Ho, Y.F., Şahin, M., Herold, M., Consoli, D. and Hengl, T., 2025. Spatiotemporal prediction of soil organic carbon density in Europe (2000–2022) using earth observation and machine learning. *PeerJ*, 13, p.e19605.
49. Tucker, C.J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing of Environment*, 8(2), pp.127-150.
50. United Nations, 2015. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations General Assembly Resolution A/RES/70/1. Available at: https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_70_1_E.pdf
51. Wu, W., Fan, Y., Wang, Z. and Liu, H., 2008. Assessing effects of digital elevation model resolutions on soil-landscape correlations in a hilly area. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 126(3-4), pp.209-216.
52. Zeraatpisheh, M., Galford, G.L., White, A., Noel, A., Darby, H. and Adair, E.C., 2023. Soil organic carbon stock prediction using multi-spatial resolutions of environmental variables: How well does the prediction

- match local references?. *Catena*, 229, p.107197.
53. Zeraatpisheh, M., Galford, G.L., White, A., Noel, A., Darby, H. and Adair, E.C., 2023. Soil organic carbon stock prediction using multi-spatial resolutions of environmental variables: How well does the prediction match local references?. *Catena*, 229, p.107197.
54. Zhang, J.X., Chang, K.T. and Wu, J.Q., 2008. Effects of DEM resolution and source on soil erosion modelling: a case study using the WEPP model. *International Journal of Geographical Information Science*, 22(8), pp.925-942.
55. Zhu, A.X., Hudson, B., Burt, J., Lubich, K. and Simonson, D., 2001. Soil mapping using GIS, expert knowledge, and fuzzy logic. *Soil Science Society of America Journal*, 65(5), pp.1463-1472.

Contents
Subject

Spatial Modeling and Prediction of the Soil Fertility Index in Two Arid and Semi-Arid Regions of Ilam Province, Iran 1

Asghar Rahmani, Mahmood Rostaminiya , Nasibeh Sayedi, and Seyed Roohollah Mousavi

Trends of nitrogen changes and the effect of amino acids on flowering and fruit set of citrus trees23

Ali Asadi kangarshahi, and Negin Akhlaghi Amiri

The Effect of Seed Coating with Biostimulants on Yield and Yield Components of Canola (Brassica napus L.).....45

Parsa Sekooti, Salim Farzaneh, Abdolghayoum Gholipouri, Shahram Khodadadi, Bahman Khoshru, and Negin Taleschian Tabrizi

Multicriteria Analysis of the Effects of Organic Growth Stimulants on Reducing Damage Caused by Drought Stress in Sugar Beet.....61

Reza Mohammadiki, Mohammad Pasandideh, Farahnaz Hamdi Holasoo, and Vali-Allah Yousef Abadi

Various aspects of analysis, interpretation and diagnosis of nutrient status using PCA, CND-clr and CND-ilr methods (a case study on sugar beet)81

Abdolmohammad Daryashenas, Karim Shahbazi , and Kambiz bazargan

Impact of Spatial Resolution of Environmental Covariates on the Accuracy of Digital Soil Mapping: A Review Based on the SCORPAN Conceptual Framework.....105

Rasoul Kharazmi, and Mohsen Bagheri Bodaghabadi

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

Soil and Water Research Institute Soil Science Society of Iran

**Research and Scientific Journal
Iranian Journal of Soil Research**

**Vol. 40, No.1
2026**

***Manager-in-Charge:* Hadi Asadi Rahmani, PhD
Director General, Soil and Water Research Institute
Editor-in-Chief: Karim Shahbazi, PhD
Professor, Soil and Water Research Institute**

Editorial Board

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

English Editor: Hamid Siadat, PhD
Technical Editor: Eng. Kiana khomehchi

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



Soil and Water Research Institute



Soil Science Society of Iran

Iranian Journal of Soil Research (Soil and Water Sciences)

Volume 40\ No.1\ 2026

ISSN: 2228 -7124

Contents Subject

- Spatial Modeling and Prediction of the Soil Fertility Index in Two Arid and Semi-Arid Regions of Ilam Province, Iran 1**
Asghar Rahmani, Mahmood Rostaminiya , Nasibeh Sayedi, and Seyed Roohollah Mousavi
- Trends of nitrogen changes and the effect of amino acids on flowering and fruit set of citrus trees23**
Ali Asadi kangarshahi, and Negin Akhlaghi Amiri
- The Effect of Seed Coating with Biostimulants on Yield and Yield Components of Canola (Brassica napus L.).....45**
Parsa Sekooti, Salim Farzaneh, Abdolghayoum Gholipouri, Shahram Khodadadi, Bahman Khoshru, and Negin Taleschian Tabrizi
- Multicriteria Analysis of the Effects of Organic Growth Stimulants on Reducing Damage Caused by Drought Stress in Sugar Beet.....61**
Reza Mohammadiki, Mohammad Pasandideh, Farahnaz Hamdi Holasoo, and Vali-Allah Yousef Abadi
- Various aspects of analysis, interpretation and diagnosis of nutrient status using PCA, CND-clr and CND-ilr methods (a case study on sugar beet)81**
Abdolmohammad Daryashenas, Karim Shahbazi , and Kambiz bazargan
- Impact of Spatial Resolution of Environmental Covariates on the Accuracy of Digital Soil Mapping: A Review Based on the SCORPAN Conceptual Framework.....105**
Rasoul Kharazmi, and Mohsen Bagheri Bodaghabadi