انجمن علوم خاک ایران

موسسه تحقیقات خاک و آب

نشریه علمی

# پژوهش‌های خاک

(علوم خاک و آب)

http:// www.srjournal.areeo.ir

ISSN: 2228 -7124

الف / جلد ۳۸ / شماره ۲ سال ۱۴۰۳

عنوان | فهرست | صفحه

برآورد سطح زیر کشت برنج در استان گیلان با استفاده از فناوری سنجش از دور و سامانه GEE.....۱۲۴
مجتبی رضایی، ابراهیم امیری و مرتضی کمالی

تاثیر کشت طولانی‌مدت پسته بر شکل‌های فسفر و برخی از ویژگی‌های خاک.....۱۴۶
فاطمه عباس زاده، مجید حجازی مهریزی، ناصر برومند و هرمزد نقوی

نقشه برداری رقومی شوری خاک با استفاده از داده‌های کمکی و مدل‌های یادگیری ماشین در حوضه آبخیز بدر، استان کردستان.....۱۶۳
مسلم زرینی بهادر و رحمان شریفی

نقش قارچ میکوریز گونه *Funneliformis mosseae* در جذب, انتقال و الگوی تجمع زیستی کادمیوم و مس در گیاه پسته.....۱۸۰
نرگس روحانی

اثر سیلیسیم و اسید هیومیک بر برخی پاسخ‌های فیزیولوژیک فلفل دلمه‌ای (*annuum L. capsicum*) در سطوح مختلف شوری.....۱۹۵
محمد کاظم دهقانی، رضا قاسمی، صدیقه صفرزاده و محمد اعتمادی

اثرهای اسید گلوتامیک و اسید آسپارتیک در کاهش تنش سرب در گیاه بادرنجبویه (*Melissa officianlis*).....۲۱۰
زهرا رمضانی، علی اشرف امیری نژاد و مختار قبادی

**وزارت جهاد کشاورزی**

**سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی**

**مؤسسه تحقیقات خاک و آب** **انجمن علوم خاک ایران**

# نشریه

# پژوهش‌های خاک

**جلد ۳۸ شماره (۲)**

**۱۴۰۳**

**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

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

*سردبیر:* **دکتر حمید سیادت** **استاد پژوهش مؤسسه تحقیقات خاک و آب**

اعضاء هیأت تحریریه (به ترتیب حروف الفبا):

| | |
|---|---|
| **دکتر محمد بای بوردی** | **مدرس دانشگاه** |
| **دکتر حسین بشارتی** | **استاد مؤسسه تحقیقات خاک و آب** |
| **دکتر محمدرضا بلالی** | **استادیار مؤسسه تحقیقات خاک و آب** |
| **دکتر کامبیز بازرگان** | **دانشیار مؤسسه تحقیقات خاک و آب** |
| **دکتر حسن توفیقی** | **دانشیار دانشگاه تهران** |
| **دکتر غلامحسین حق نیا** | **استاد دانشگاه فردوسی مشهد** |
| **دکتر کاظم خاوازی** | **استاد مؤسسه تحقیقات خاک و آب** |
| **دکتر محمدحسن روزیطلب** | **دانشیار پژوهش سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی** |
| **دکتر امیر فتوت** | **استاد دانشگاه فردوسی مشهد** |
| **دکتر منوچهر گرجی** | **استاد دانشگاه تهران** |
| **دکتر عزیز مؤمنی** | **دانشیار مؤسسه تحقیقات خاک و آب** |
| **دکتر محمدرضا نیشابوری** | **استاد دانشگاه تبریز** |

ویراستار انگلیسی: **دکتر حمید سیادت**

تایپ و صفحه آرایی: **مهندس کیانا خامه‌چی**

تعداد انتشار در سال: **چهار شماره**

پایگاه الکترونیکی نشریه پژوهش‌های خاک: **www.srjournal.areeo.ir**

پایگاه الکترونیکی موسسه تحقیقات خاک و آب: **www.swri.ir**

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

آدرس الکترونیکی دفتر مجله: **majalehsoil@yahoo.com**

این نشریه در پایگاه‌های علمی زیر نمایه می‌شود:

پایگاه استنادی علوم جهان اسلام (**ISC**): **www.isc.gov.ir**

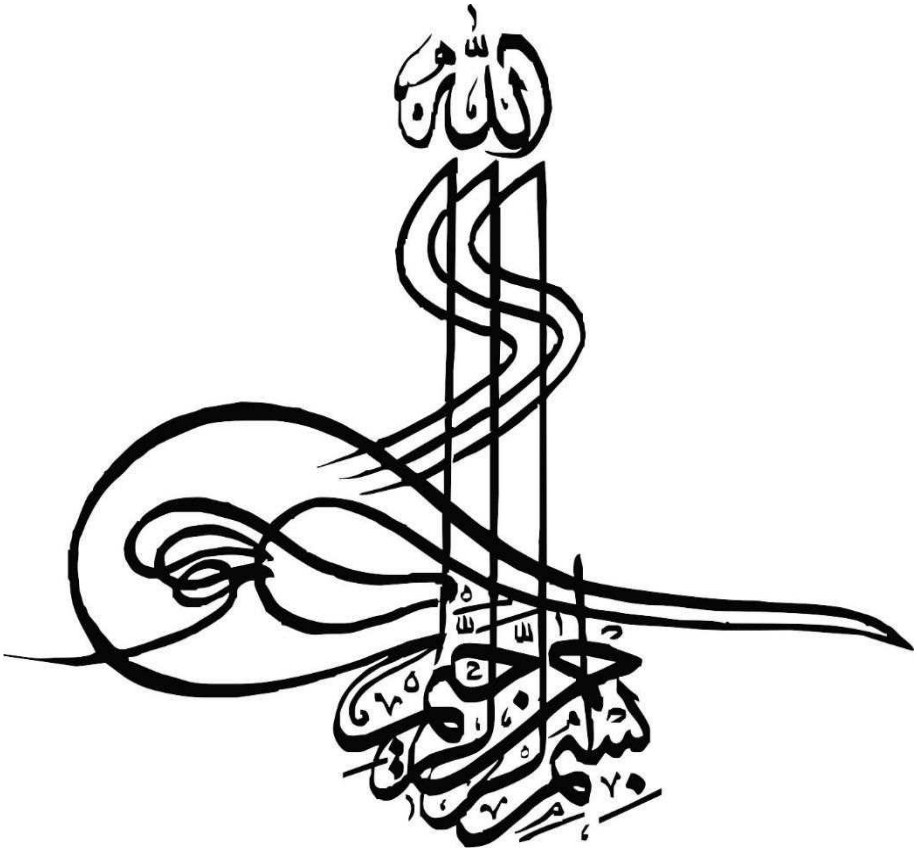
و همچنین در پایگاه (**ISC**) از ضریب تأثیر (**IF**) برخوردار می‌باشد

پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی: **www.sid.ir**

پایگاه سیویلیکا**www.civilica**

***آدرس: کرج - میدان استاندارد، جاده مشکین دشت، بعداز رزکان نو، بلوار امام خمینی، موسسه تحقیقات خاک و آب، کد پستی: ۳۱۷۷۹۹۳۵۴۵***

***تلفن و نمابر: ۳۶۲۰۸۷۹۶ (۰۲۶)*** ***آدرس پایگاه الکترونیکی مجله: www.srjournal.areeo.ir***


بسم الله الرحمن الرحيم

عنوان | فهرست | صفحه

برآورد سطح زیر کشت برنج در استان گیلان با استفاده از فناوری سنجش از دور و سامانه GEE.....۱۲۴
مجتبی رضایی، ابراهیم امیری و مرتضی کمالی

تاثیر کشت طولانی‌مدت پسته بر شکل‌های فسفر و برخی از ویژگی‌های خاک.....۱۴۶
فاطمه عباس زاده، مجید حجازی مهریزی، ناصر برومند و هرمزد نقوی

نقشه برداری رقومی شوری خاک با استفاده از داده‌های کمکی و مدل‌های یادگیری ماشین در حوضه آبخیز بدر، استان کردستان.....۱۶۳
مسلم زرینی بهادر و رحمان شریفی

نقش قارچ میکوریز گونه ***Funneliformis mosseae*** در جذب, انتقال و الگوی تجمع زیستی کادمیوم و مس در گیاه پسته.....۱۸۰
نرگس روحانی

اثر سیلیسیم و اسید هیومیک بر برخی پاسخ‌های فیزیولوژیک فلفل دلمه‌ای (***annuum L. capsicum***) در سطوح مختلف شوری.....۱۹۵
محمد کاظم دهقانی، رضا قاسمی، صدیقه صفرزاده و محمد اعتمادی

اثرهای اسید گلوتامیک و اسید آسپارتیک در کاهش تنش سرب در گیاه بادرنجبویه (***Melissa officianlis***).....۲۱۰
زهرا رمضانی، علی اشرف امیری نژاد و مختار قبادی

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

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

**الف) اصول کلی**

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

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

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

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

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

**ب) نحوه تهیه و ارسال مقاله**

**نحوۀ نگارش مقاله**

**۱- مقاله حداکثر در ۱۵ صفحۀ A4 با فاصلۀ خطوط ۱/۵ و حاشیه‌های ۳ سانتی‌متر از هر طرف و به صورت تک ستونی در نرم افزار Word 2007 تایپ شود.**

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

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

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

**جدول ۱- نوع قلم و اندازه**

| موقعیت استفاده | نام قلم | اندازه قلم |
|---|---|---|
| عنوان مقاله | Nazanin پر رنگ | 14 |
| متن مقاله | Nazanin | 12 |
| عناوین بخش های مقاله | Nazanin پر رنگ | 12 |
| نام مؤلفان | Nazanin پر رنگ | 12 |
| کلمه چکیده و کلمات کلیدی | Nazanin پر رنگ | 12 |
| عناوین جداول و اشکال | Nazanin پر رنگ | 11 |
| متن جداول و شکل ها و منابع | Nazanin | 11 |
| اعداد جداول | Times New Roman | یک واحد کمتر از اندازۀ فارسی در هر موقعیت |
| متن انگلیسی | Times New Roman | یک واحد کمتر از اندازۀ فارسی در هر موقعیت |

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

**شناسنامه مقاله**

**مقالات باید شامل عنوان، چکیده فارسی و انگلیسی (حداکثر تا ۳۰۰ کلمه)، واژه‌های کلیدی (Keywords)، مقدمه، مواد و روش‌ها، نتایج، بحث و نتیجه‌گیری، تشکر و قدردانی (در صورت نیاز) و فهرست منابع باشد.**
**برگ شناسه**
**عنوان مقاله، نام، نام خانوادگی، موقعیت شغلی نگارنده(گان)، نام دانشگاه یا مؤسسه پژوهشی که نگارنده(گان) در آن اشتغال دارند، نشانی کامل نگارنده(گان) و نام و مشخصات نگارنده مسئول مکاتبات (به هر دو زبان فارسی و انگلیسی) و پست الکترونیکی همه نویسندگان در صفحه چکیده ها تایپ و در قسمت فایل‌های با نام نویسنده (گان) بارگذاری نمایید و در قسمت بدون نامه نویسنده(گان) مقاله بدون نام بارگذاری گردد.**
*** نگارنده مسئول باید فرم تعهدنامه را که با امضای کلیه نگارندگان و الزامی می باشد در قسمت فایل‌های پیشنیاز بارگذاری نماید.**

**عنوان مقاله**

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

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

**واژه های کلیدی:**
**واژه های کلیدی بایستی ۶-۳ کلمه باشد. واژه های کلیدی چکیده انگلیسی نیز بایستی ترجمه دقیق واژه های چکیده فارسی باشد.**
**در انتخاب واژه‌های کلیدی از تکرار واژه‌هایی که در عنوان مقاله آمده است خودداری فرمایید**

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

**مواد و روش‌ها**

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

**نتایج**

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

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

**بحث**

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

**تشکر و قدردانی**

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

**فهرست منابع**

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

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

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

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

نگارنده دارند) زیر هم آورده شوند. چنانچه از یک نگارنده چندین منبع ذکر شود، ترتیب درج آن‌ها بر حسب سال انتشار، از جدید به قدیم است. اگر از نگارنده‌ای چندین منبع همسال وجود داشته باشد، با گذاشتن حروف **a**، **b** و **c** پس از سال انتشار منابع از یکدیگر متمایز شوند. چنانچه مقالات منفرد و مشترک از یک نگارنده ارائه شود، نخست مقالات منفرد و سپس مقاله‌های مشترک به ترتیب حروف الفبای نام نگارندگان بعدی مرتب شوند.

برای یک مقاله به ترتیب نام خانوادگی نگارنده، حرف اول اسم کوچک نگارنده، تاریخ انتشار، عنوان مقاله عنوان کامل مجله، شماره جلد، و اولین و آخرین صفحه مقاله ارائه شود. برای یک کتاب به ترتیب نام خانوادگی و سپس حرف اول نام کوچک نگارنده، تاریخ انتشار، عنوان کامل کتاب، شماره جلد، نام ناشر، محل انتشار و تعداد کل صفحات ارائه شود. در مورد مقاله یا کتاب‌هایی که بیش از یک نویسنده دارند به ترتیب نام خانوادگی و حرف اوّل نام اوّلین نویسنده و سپس اوّل نام نویسندگان بعدی و پس از آن نام خانوادگی آن‌ها ذکر شود.

در مورد مرجعی که نویسنده آن مشخص نیست به جای نام نگارنده از "**Anonymous**" برای منابع انگلیسی و (بی نام) برای منابع فارسی استفاده شود.

چنانچه منبع ترجمه شده باشد، در فهرست منابع باید نخست نام نویسنده(گان) کتاب اصلی، عنوان مشخصات آن (به زبان انگلیسی) و سپس نام مترجم (مترجمان) ذکر شود.

مثال‌های برای تنظیم منابع

مقاله از مجله

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

مقاله از کارگاه آموزشی یا علمی

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

مطلب از کتاب

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

مطلب نقل شده یک نویسنده در یک مجموعه مقالات

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

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

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

ذکر مطلب از اینترنت

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

**منابع مورد استفاده در متن بدین صورت نگاشته شوند:**
**بای بوردی و همکاران (۱۳۸۲) گزارش کردند...**
**اسمیت (۲۰۰۲) گزارش کرد ...**
**اسمیت و جونز (۲۰۰۲) گزارش کردند...**
**اسمیت و همکاران (۲۰۰۲) گزارش کردند...**

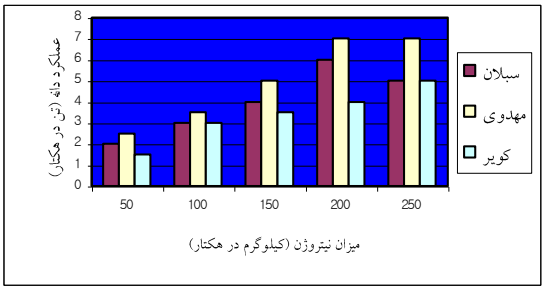
**- در صورت عدم رعایت دقیق مطالب فوق‌الذکر، مقاله پذیرفته نمی‌شود و پیش از بررسی به اطلاع نویسنده مسئول می‌رسد. بدیهی است چنانچه مقاله ارسالی با شرایط ذکر شده تهیه و عودت داده شود مجدداً از زمان برگشت که تاریخ واقعی مقاله منظور می‌شود مورد بررسی قرار خواهد گرفت.**

جدول نامناسب

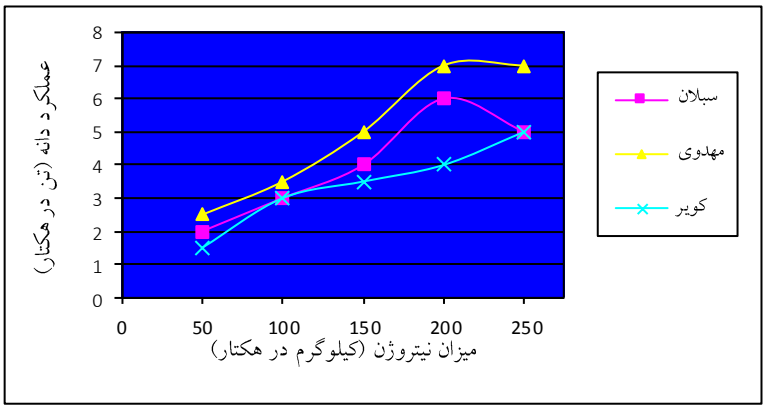
| *بافت* | *Mgexch* | *Kavail.* | *Pavail* | OC (%) | TNV (%) | EC (dS. m-1) | pH | عمق (cm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | *(Mg.kg-1)* | | | | | | | |
| لومی رسی | ۳۰۰ | ۲۹۰ | ۳/۶ | ۰/۶۲ | ۲۸ | ۷/۶ | ۸/۲ | ۰-۳۰ |
| لومی رسی | ۳۰۵ | ۲۹۵ | ۰/۶ | ۰/۵۰ | ۳۰ | ۷/۲ | ۸/۲ | ۳۰-۶۰ |
| لومی شنی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

جدول مناسب

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

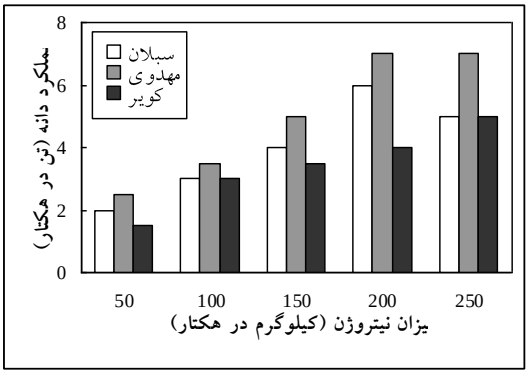



**«نامناسب»**

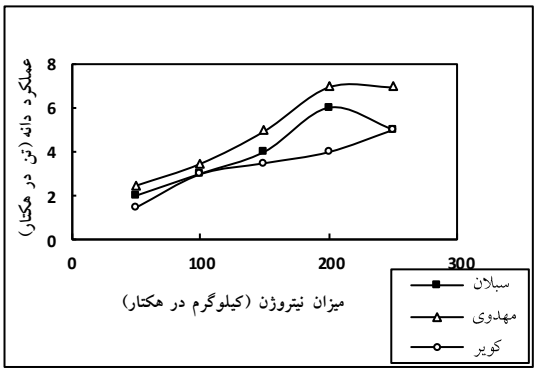



**«مناسب»**

---




**«نامناسب»**




«مناسب»

# فرم تعهد نامه

**نشریه پژوهش‌های خاک**

**اینجانب ..... نویسنده مسئول مقاله زیر:**

- **سال‌های اجراء آزمایش ذکر شود**

**موارد زیر را به آگاهی می رسانم:**

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

**نام نام خانوادگی نویسنده اول:** **امضاء نویسنده اول مقاله**

**نام نام خانوادگی نویسنده دوم:** **امضاء نویسنده دوم مقاله**

**نام نام خانوادگی نویسنده سوم:** **امضاء نویسنده سوم مقاله**

**نام نام خانوادگی نویسنده چهارم:** **امضاء نویسنده چهارم‌مقاله**

| اسامی داوران | تعداد داوری |
|---|---|
| دکتر کامبیز بازرگان | ۲ |
| دکتر حسین بشارتی | ۱ |
| دکتر هوشنگ خسروی | ۲ |
| دکتر ناصر علی اصغرزاد | ۱ |
| دکتر امیر فتوت | ۲ |
| دکتر جهانگرد محمدی | ۱ |
| دکتر فرهاد مشیری | ۳ |
| دکتر عزیز مؤمنی | ۲ |
| دکتر هرمز نقوی | ۱ |
| دکتر میرناصر نویدی | ۲ |
| دکتر شادمان ویسی | ۴ |
| دکتر مژگان یگانه | ۱ |

پژوهش‌های خاک / الف / جلد ۳۸ / شماره۲ تابستان/ ۱۴۰۳/ ۱۲۴-۱۱۳
https://doi.org/10.22092/IJSR.2024.366254.750

# برآورد سطح زیر کشت برنج در استان گیلان با استفاده از فناوری سنجش از دور و سامانه GEE

مجتبی رضایی*، ابراهیم امیری و مرتضی کمالی

موسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایرانrezaei7@gmail.com

استاد گروه مهندسی آب، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایرانeamiri57@yahoo.com

موسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایرانmortezakamali2013@gmail.com

«مقاله پژوهشی»

دریافت: ۱۴۰۳/۴/۱۲ و پذیرش:۱۴۰۳/۷/۲۵

## چکیده

**کمبود آب، افزایش هزینه‌های تولید، تغییر کاربری اراضی و افزایش تقاضا برای غذا سبب شده تا پایش دقیق مکانی و زمانی سطح زیر کشت برنج به عنوان یک محصول استراتژیک، برای برنامه ریزان و تصمیم‌گیران دارای اهمیت فوق‌العاده‌ای باشد. روش‌های میدانی برآورد سطح زیر کشت محصولات در سطوح وسیع، هزینه‌بر و زمان‌بر است اما فناوری سنجش از دور داده های لازم را با سرعت زیاد و هزینه اندک در اختیار مدیران قرار میدهد. هدف از این پژوهش، استفاده از تصاویر سنجش از دور در برآورد سطح زیر کشت برنج در استان گیلان با بکارگیری بهترین روش طبقه‌بندی نظارت شده است. از این رو تصاویر ماهواره سنتینل ۲ با استفاده از ۶ روش طبقه‌بندی نظارت شده شامل روش‌های ML، CART، RF، SVM، GME و RF-NDVI تحلیل شد. روش ML در محیط ENVI و بقیه روش‌ها با محاسبات در فضای ابری محیط GEE انجام شد. نتایج استفاده از روش‌های طبقه‌بندی نشان داد که روش جنگل تصادفی به همراه شاخص گیاهی NDVI (RF-NDVI) با ضریب کاپای ۰/۹۴ و صحت کل ۰/۹۰ مقایسه با سایر روش‌ها بالاترین دقت را دارد که نشان‌دهنده تأثیر شاخص گیاهی در برقراری تمایز بین سطح زیر کشت برنج و دیگر کاربری‌ها است. برآورد سطح زیر کشت برنج استان با این روش نشان داد که سطح خالص کل زمین‌های شالیزاری استان گیلان ۲۱۸۱۳۵ هکتار است که در مقایسه با آمار موجود سازمان جهاد کشاورزی (۲۳۸۰۱۲ هکتار) و شرکت آب منطقه‌ای استان گیلان (۲۴۵۰۰۰ هکتار) به ترتیب ۸/۳۵٪و ۱۰/۹۶٪برآورد کمتری است.**

**واژه‌های کلیدی:** طبقه‌بندی نظارت شده، سنتینل ۲، تصاویر ماهواره‌ای، رانش ابری

*- آدرس ایمیل نویسنده مسئول: mreaeii@yahoo.com

CC BY

**مقدمه**

برنج یکی از منابع مهم تأمین کالری مردم ایران است. این گیاه در مناطق زیادی از کشور کشت می‌شود. استان‌های گیلان و مازندران با در اختیار داشتن بیش از ۷۰ درصد سطح زیر کشت برنج، مهم‌ترین مناطق برنج‌خیز ایران هستند (وزارت جهاد کشاورزی، ۱۴۰۲). با تغییر کاربری اراضی کشاورزی و تبدیل آن‌ها به کاربری‌های غیر کشاورزی خصوصاً مسکونی (درودیان و درودیان، ۱۳۹۶)، کاهش سطح زیر کشت برنج در این استان‌ها محتمل به نظر می‌رسد. پایش مداوم و در اختیار داشتن اطلاعات دقیق و بهنگام از این تغییرات ابزار لازم را برای مدیریت بهینه زراعی و پیش‌بینی میزان تولید سالیانه، در اختیار مدیران قرار می‌دهد (لاتام، ۲۰۰۹؛ تنکابال و همکاران، ۲۰۰۹). تجارب نشان داده که دریافت این اطلاعات از طریق برداشت زمینی بسیار وقت‌گیر و پرهزینه است. اما استفاده از روش‌های نوینی نظیر سنجش از دور که در سال‌های اخیر برای پایش محصولات کشاورزی توسعه یافته‌اند، در مقایسه با روش‌های سنتی مزرعه‌ای، ضمن صرف هزینه و نیروی کار بسیار کمتر، کارایی و سرعت بسیار بالاتری دارند (فاچوراچمن و همکاران، ۲۰۲۲).

تاکنون از داده‌های ارزان و گاهاً مجانی سنجش از دور برای پیش‌بینی عملکرد و زیست‌توده (رضایی و همکاران، ۲۰۱۶؛ جین و همکاران، ۲۰۲۰؛ رمی و همکاران، ۲۰۲۰، آسمار و همکاران، ۲۰۲۴)، پهنه‌بندی سطح زیر کشت محصولات کشاورزی (عبیات و همکاران، ۱۴۰۱؛ علیپور و همکاران، ۱۳۹۳؛جلی وهمکاران، ۲۰۱۵؛ تلوگونتلا و همکاران، ۲۰۱۸)، تفکیک مزارع (پرز سولار و همکاران، ۲۰۲۱؛ فیضی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷) و پایش مزارع (ان گویان تان و همکاران، ۲۰۲۰) استفاده شده است. اگرچه دسترسی به این فناوری توانایی انجام پایش‌های متعددی را ممکن ساخته، اما از سوی دیگر دسترسی آسان و رایگان به داده‌های حجیم و غیرهمگون که از منابع متعددی به دست می‌آیند (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۹)، سبب زمان‌بر شدن استخراج اطلاعات از این تصاویر با روش‌های سنتی و در برخی مواقع ایجاد خطای بصری به دلیل پیچیدگی عوارض شده است (لی و همکاران، ۲۰۲۳). الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توانند دقت و سرعت پردازش داده‌ها را بدون دخالت مستقیم انسان افزایش دهد (سارکر، ۲۰۲۱). مهم‌ترین کاری که الگوریتم‌های یادگیری ماشین در سنجش از دور انجام می‌دهند، طبقه‌بندی داده‌ها است (ورده و همکاران، ۲۰۲۰). طبقه‌بندی یک تصویر، فرآیندی اجرایی برای شناسایی کلاس‌های طیفی مختلف و ارتباط بین انواع پوشش‌های زمینی است (لیلسند و همکاران، ۲۰۰۴) که عموماً به دو صورت نظارت شده و نظارت‌نشده انجام می‌شود (ژائو و همکاران، ۲۰۲۱).

در روش نظارت‌نشده که در آن انجام طبقه بندی بدون استفاده از داده های تعلیمی انحام می‌شود. اما در روش طبقه‌بندی نظارت شده پس از انجام نمونه‌برداری‌های صحرایی از کلاس‌های موجود در منطقه مورد مطالعه و معرفی خصوصیات طیفی هر یک از آن‌ها (بر روی تصاویر ماهواره‌ای) به عنوان داده‌های تعلیمی به نرم‌افزار معرفی شده و سپس عمل طبقه‌بندی روی تمام تصویر انجام می‌شود (فاچوراچمن و همکاران، ۲۰۲۲). مطالعات زیادی برای برآورد سطح شالیزارها با الگوریتم‌های مختلف طبقه‌بندی نظارت شده و نظارت‌نشده و با استفاده از داده‌های سنجش از دور نوری[1] (ریاحی و همکاران، ۱۳۹۸؛ موسوی و همکاران، ۲۰۲۰؛ هودایت و پاتل، ۲۰۲۲) و سنجش از دور میکروویو[2] (دونگ و ژیائو، ۲۰۱۶؛ پاجوئت و همکاران، ۲۰۲۰) انجام شده است. روش مرسوم انجام طبقه‌بندی استفاده از نرم‌افزارهای موجود مانند ENVI و یا بکارگیری پلتفرم‌هایی نظیر Google Earth Engine (GEE) است (گورلیک و همکاران، ۲۰۱۷). GEE سامانه ای است که با استفاده از فضای ابری، پردازش داده‌های چندطیفی ماهواره‌ای را بسیار آسان ساخته و در اجرای آنلاین ایده‌های سنجش از دور کارایی و سرعت بسیار بالایی دارد (گورلیک و همکاران، ۲۰۱۷). از این سامانه

1POT-VGT, MODIS, Landsat, Sentinel 2

2RADARSAT, PALSAR, Sentinel 1

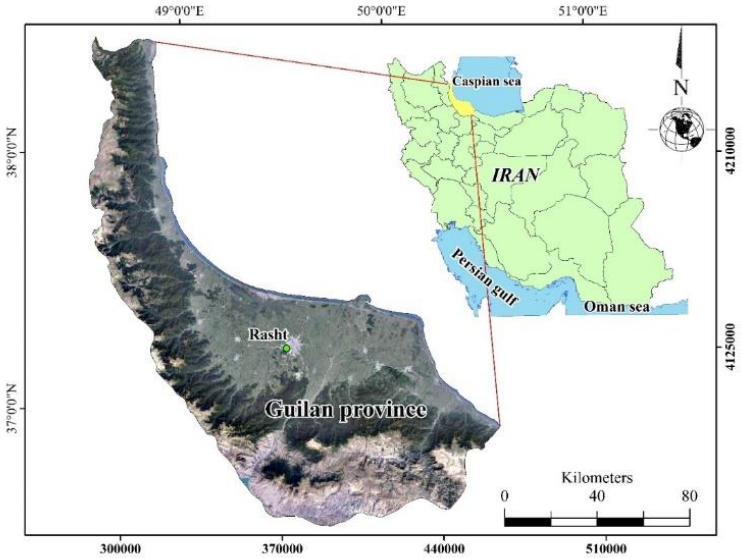
برای اموری نظیر تولید نقشه‌های زمینی چند کلاسه (هوانگ و همکاران، ۲۰۱۸)، پایش کیفیت آب دریاها و دریاچه‌ها (ان-یاگا و همکاران، ۲۰۱۹)، تولید نقشه‌های مناطق جنگلی و پایش مستمر آن‌ها (چن و همکاران، ۲۰۱۷)، تولید نقشه‌های مناطق شهری (لیو و همکاران، ۲۰۱۸) و تولید نقشه اراضی کشاورزی (ژیونگ و همکاران، ۲۰۱۷؛ تلوگونتلا و همکاران، ۲۰۱۸) استفاده شده است.

علیرغم مطالعات گسترده در سطح بین‌المللی برای ارزیابی کارایی سامانه GEE در پایش اراضی کشاورزی، متأسفانه کاربرد این روش در داخل ایران خصوصاً برای پایش شالیزارهای کشور و نحوه پراکنش این اراضی فراگیر نشده است. به همین دلیل توسعه روشی دقیق و سریع برای برآورد سطح زیر کشت اراضی شالیزاری برای برنامه‌ریزی‌های مدیریت بهینه توزیع آب و حفظ امنیت غذایی بیش از پیش احساس می‌شود. هدف از این تحقیق ارزیابی تهیه نقشه سطح زیر کشت برنج در استان گیلان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و معرفی یک روش سریع، آسان و قابل تکرار در برآورد سطح کل اراضی شالیزاری استان است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

استان گیلان با مساحت تقریبی ۱۴۷۱۱ کیلومتر مربع در عرض جغرافیایی ۳۶ درجه تا ۳۳ دقیقه و ۳۸ درجه و ۲۷ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۸ درجه تا ۳۲ دقیقه و ۴۸ درجه و ۵۰ درجه و ۳۶ دقیقه شرقی واقع شده است (شکل ۱). اقلیم استان بر اساس طبقه‌بندی کوپن-گیگر (بر اساس داده ۳۹ ساله)، معتدل بسیار مرطوب است. محدوده زمانی کاشت تا برداشت برنج در استان گیلان از اوایل فرودین (خزانه‌گیری نشا) تا پایان شهریور (برداشت محصول) است. وسعت اراضی شالیزاری استان طبق آمار جهاد کشاورزی ۲۳۰ هزار هکتار است (وزارت جهاد کشاورزی، ۱۴۰۲). بخش‌های دیگر پوشش گیاهی این استان شامل درختان هیرکانی، مرتع، درختان کاج، صنوبر، چای و یا باغات دائمی هستند. این موضوع جداسازی شالیزار از سایر پوشش‌های گیاهی و تهیه نقشه پوشش زمینی در روش طبقه‌بندی بر اساس تاریخ کشت و با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای قبل از نشاکاری و بعد از آن را دشوار می‌سازد.



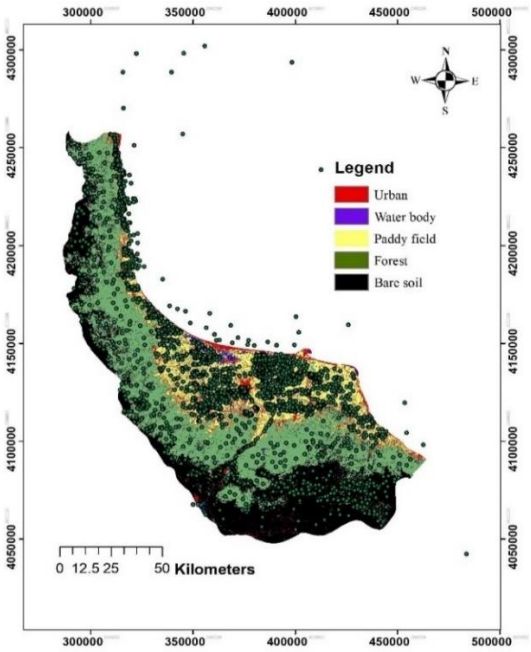

**شکل ۱- موقعیت استان گیلان**

## تهیه داده‌های میدانی و نمونه‌های تعلیمی

داده‌های میدانی مربوط به کاربری اراضی شامل اراضی شالیزاری و سایر کاربری‌ها، با مراجعه به گزارش‌ها، مستندات، تصاویر گوگل ارث و بازدید از منطقه با استفاده از دستگاه موقعیت‌یاب جهانی[1] ثبت گردید تا بتوان میزان انطباق نتایج را با واقعیت زمینی افزایش داد. این داده‌ها شامل ۲۷۵۶ نمونه بود که به روش تصادفی برداشت شد (جدول ۱). برای انجام آنالیز بر روی داده‌های ماهواره‌ای تعداد ۷۰ درصد از این نمونه‌ها به عنوان نمونه تعلیمی جهت انجام طبقه‌بندی و ۳۰ درصد نیز برای بررسی میزان صحت طبقه‌بندی استفاده شد (شکل ۲ و ۳).

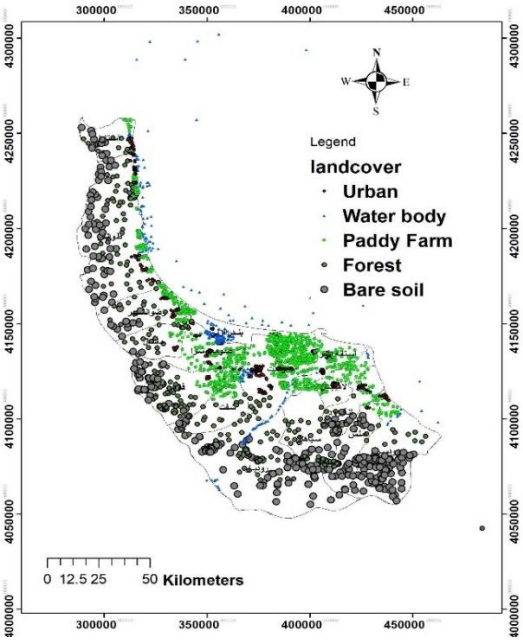
**جدول ۱- تعداد نقاط برداشت شده از هر کاربری جهت آموزش و صحت سنجی طبقه‌بندی**

| نوع کاربری | تعداد نقاط |
|---|---|
| خاک لخت و کم پوشش | 467 |
| نواحی شهری | 472 |
| پیکره‌های آبی | 309 |
| نواحی جنگلی | 397 |
| شالیزار | 1111 |
| کل | 2756 |




**شکل ۲- نقشه نقاط نمونه‌برداری استان گیلان در کلاس‌های مختلف کاربری اراضی**

[1] GPS




**شکل ۳- نقشه نقاط نمونه‌برداری استان گیلان**

## تهیه و تصحیح تصاویر ماهواره‌ای

ماهواره سنتینل ۲ به عنوان بخشی از برنامه کوپرنیک آژانس فضایی اتحادیه اروپا با هدف جمع‌آوری اطلاعات با استفاده از سنسور نوری، طراحی شد و در مدار قرار گرفت (گسکان و همکاران، ۲۰۱۷). این تصاویر دارای چهار باند طیفی در محدوده مرئی و مادون قرمز نزدیک (قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر)، شش باند طیفی در محدوده مادون قرمز کوتاه و لبه قرمز (قدرت تفکیک مکانی ۲۰ متر) و سه باند طیفی با اندازه تفکیک ۶۰ متر هستند. برای انجام این پژوهش تصاویر ماهواره سنتینل ۲ از ابتدا تا انتهای دوره رویش برنج (اواخر June تا اوایل Aug سال ۲۰۲۳) با مبنای WGS1984 دریافت شد. تصاویر پس از دانلود در محیط نرم‌افزار ENVI مورد تصحیح هندسی، رادیومتریکی و اتمسفری قرار گرفتند. سپس با استفاده از دستور موزاییک کردن[1]، تصاویر با هم ادغام شدند و در نهایت کلیه اقدامات مربوط به تهیه نقشه کاربری اراضی بر روی آن انجام شد. به منظور محاسبه پارامترهای آماری با استفاده از نرم‌افزار ENVI از منوی CLASSIFICATION و برای اندازه‌گیری دقت طبقه‌بندی از ماتریس خطا استفاده شد.

## طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای

در این پژوهش از روش های حداکثر احتمال[2] (ML)، درختان طبقه‌بندی و رگرسیون[3] (CART)، جنگل تصادفی[4] (RF)، ماشین بردار پشتیبان[5] (SVM)، حداکثر آنتروپی تعمیم‌یافته[6] (GME)، و جنگل تصادفی با استفاده از شاخص نرمال شده اختلاف پوشش گیاهی[7] (NDVI) (RF_NDVI) برای طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای استفاده شد.

روش حداکثر احتمال در محیط نرم‌افزار ENVI 5.3.1 و سایر روش‌های طبقه‌بندی نظارت شده در محیط گوگل ارث انجین[8] (GEE) و با نوشتن کدهای مربوطه با استفاده از زبان برنامه‌نویسی جاوا اسکریپت (JS)[9] انجام شده است. پلتفرم GEE که با استفاده از محاسبات ابری و بر پایه زبان‌های JS و پایتون[10] توسط شرکت گوگل است،

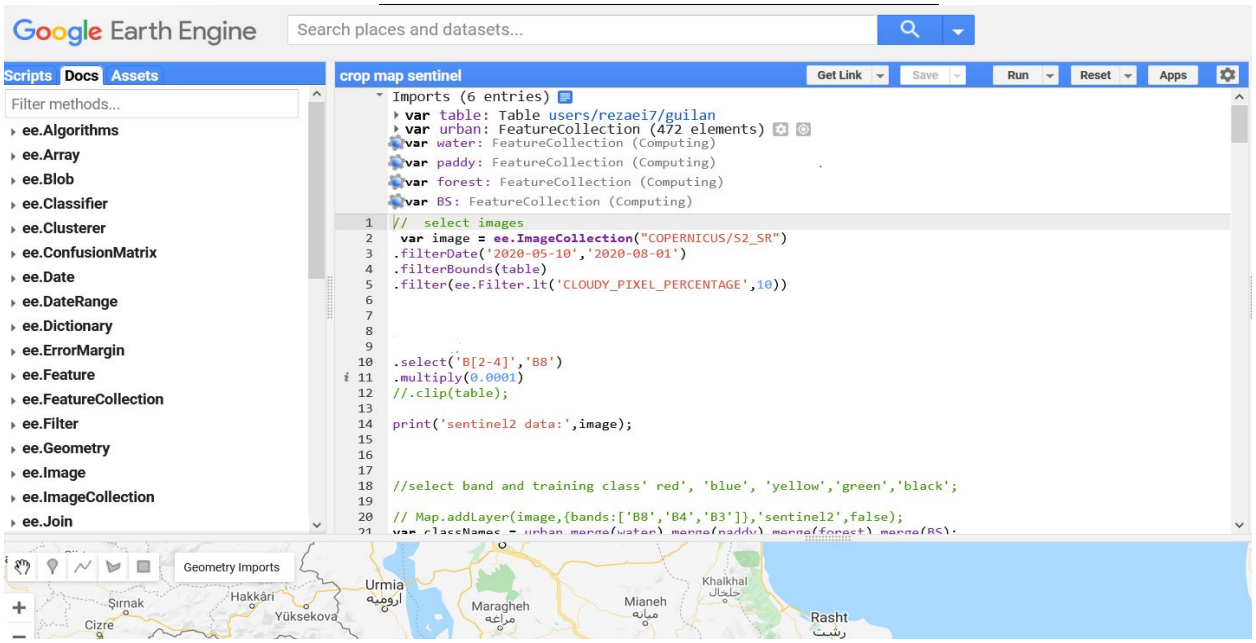
[1] seamless mosaic
[2] Maximum Likehood
[3] Classification and Regression Tree
[4] Random Forest
[5] Support Vector Machine
[6] General Maximum Entropy
[7] Normalized Difference Vegetation Index
[8] Google Earth Engine
[9] JavaScript
[10] Python

خدمات در زمینه سنجش از دور را ارائه می‌دهد.

در روش‌های طبقه‌بندی بالا تصاویر ماهواره سنتینل ۲ مربوطه به منطقه مورد مطالعه در دوره کشت برنج فراخوانی و باندهای ۳، ۴ و ۸ از آن‌ها جدا شده (جدول ۲) و سپس با انجام عملیات ریاضی مقدار میانه در هر پیکسل به دست آمد و تمام عملیات بر روی تصویر میانه و در محیط GEE محاسبه شد. با استفاده از امکانات موجود در سامانه GEE به راحتی می‌توان نمونه های تعلیمی متعددی برای هر طبقه معرفی کرد. الگوریتم طبقه‌بندی با استفاده از این نمونه‌ها آموزش می‌بیند و توانایی آن را پیدا می‌کند تا پیکسل‌های مشابه را شناسایی کند. پس از اتمام این مرحله، طبقه‌بندی بر اساس نمونه‌های تعلیمی صورت می‌گیرد. شکل ۴ نمونه‌ای از کدنویسی در محیط GEE را نشان می‌دهد[1].

**جدول ۲- باندهای ماهواره سنتینل مورد استفاده در این پژوهش**

| طول موج (نانومتر) | نام | باند |
|---|---|---|
| 560 | Green | 3 |
| 665 | Red | 4 |
| 842 | Infrared | 8 |




**شکل ۴- نمونه کد نویسی در محیط GEE**

در روش RF-NDVI برای بررسی تأثیر افزایش باند و دقت طبقه‌بندی علاوه بر ۳ باند ۳، ۴ و ۸ یک باند شامل مقدار شاخص NDVI نیز استفاده گردید. شاخص NDVI یکی از کاربردی‌ترین شاخص‌های پوشش گیاهی است که کارایی مفید آن در بسیاری از مطالعات توسط محققان مختلف گزارش شده است. مبنای ساختاری این شاخص وجود کلروفیل در گیاه است. این شاخص از طریق رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \quad (۱)$$

در این رابطه، NIR و Red به ترتیب نشان‌دهنده بازتاب از اشعه نزدیک مادون قرمز و قرمز هستند. ارزش عددی شاخص NDVI بین اعداد ۱+ و ۱- در نوسان است که هر چه به عدد ۱+ نزدیک شود بر میزان پوشش گیاهی افزوده می‌گردد.

## شاخص‌های ارزیابی

پس از اعمال الگوریتم طبقه‌بندی برای درک نتایج به

[1] کد مقاله از طریق مکاتبه با نگارنده مسئول قابل ارائه است.

دست آمده و به کار بردن این نتایج برای تصمیم‌گیری‌ها و انتخاب بهترین روش طبقه‌بندی برای پهنه‌بندی کاربری اراضی و استخراج سطح شالیزارهای استان گیلان، اقدام به ارزیابی دقت طبقه‌بندی شد. معمول‌ترین پارامتر برآورد دقت، شامل صحت کل[1] و ضریب کاپا[2] است (Lu et al, 2003). صحت کل از رابطه ۲ بدست می‌آید:

(۲)

$$OA=(\sum_{i}^{C} -I^{E\ ij})/N$$

که در آن C، تعداد کلاس‌ها، N تعداد کل پیکسل‌های معلوم و $E_{ij}$ اعضای قطری ماتریس خطا است. صحت کل از ساده‌ترین پارامترهای دقت است که نیاز به عملیات پیچیده برای محاسبه ندارد و یک برآورد کلی از صحت طبقه‌بندی و یا میانگینی از صحت طبقه‌بندی است. خروجی این شاخص بین ۰ در صد تا ۱۰۰ در صد است که نتیجه خروجی هر چه به سمت ۱۰۰ درصد پیش برود به معنای صحت بالای طبقه‌بندی است و هر چه به سمت صفر باشد، بیانگر صحت پایین طبقه‌بندی داده‌ها است (Jafari and Nazarisamani, 2013).

از نظر تئوری، احتمالات صحت کل نمی‌تواند معیار خوبی برای ارزیابی طبقه‌بندی با شد، زیرا در این شاخص، نقش شانس قابل‌توجه است بنابراین، به دلیل ایرادات وارد بر دقت کل از ضریب کاپا استفاده می‌شود (بنیاد و قادری، ۱۳۸۶). این ضریب دقت طبقه‌بندی را نسبت به یک طبقه‌بندی کاملاً تصادفی محاسبه می‌کند. به این معنی که مقدار طبقه‌بندی را نسبت به حالتی که یک تصویر کاملاً به صورت تصادفی طبقه‌بندی شود به دست می‌آورد (Igué et al., 2012). ضریب کاپا از رابطه ۳ به دست می‌آید:

(۳)

Kappa (انتظار –مشاهده) / (انتظار – ۱)

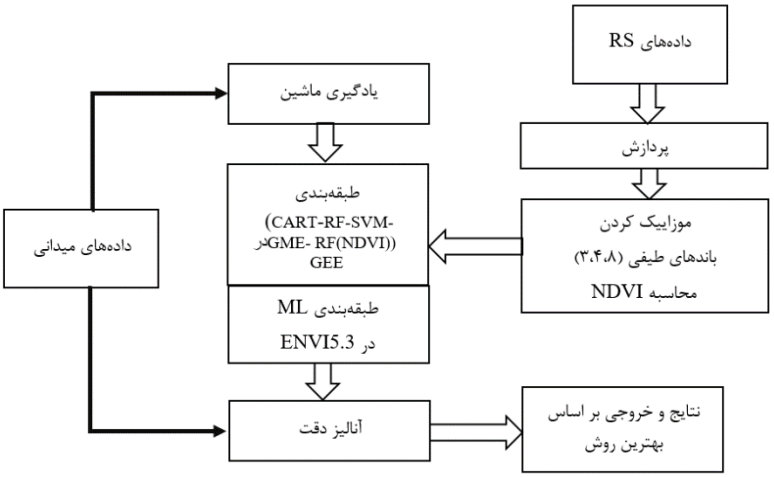
که در این رابطه مشاهده همان صحت کلی است. انتظار هم با استفاده از ستون‌ها و ردیف‌های ماتریس ابهام محاسبه می‌شود (رابطه ۴):

(۴)

انتظار= مجموع عوامل قطری /کل مجموع عوامل

ضریب کاپا به منظور ارزیابی میزان تصادفی بودن صحت طبقه‌بندی عددی بین ۰ تا ۱ ارائه می‌دهد که صفر به معنای کاملاً تصادفی بودن طبقه‌بندی و یک به معنی غیر تصادفی بودن صحت طبقه‌بندی است.

شکل ۵ مراحل انجام پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.




**شکل ۵- مراحل انجام پژوهش**

[1] Overall Accuracy

[2] Kappa coefficient

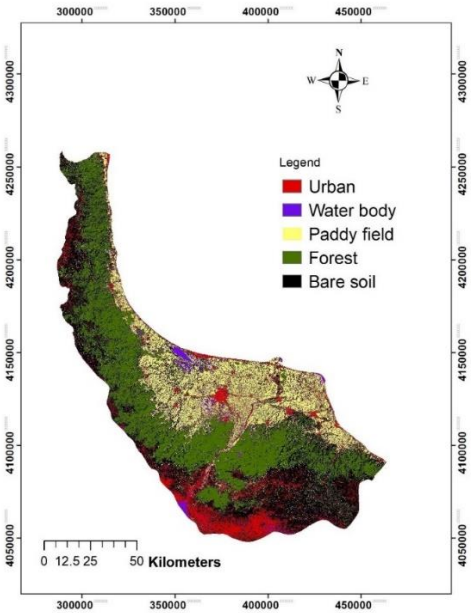
## یافته‌ها و بحث

جدول ۳ میزان ضریب کاپا و صحت کل روش‌های مختلف مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج حاصله، روش RF-NDVI دارای ضریب کاپا و صحت کل بالاتری نسبت به سایر روش‌ها (بترتیب ۰/۹۰ و ۰/۹۴) بوده است که نشان‌دهنده توانایی بالای این روش در کلاس‌بندی دقیق پوشش اراضی است. پس از روش RF-NDVI، دقت روش حداکثر احتمال با ضریب کاپا و صحت کل بترتیب ۰/۸۹ و ۰/۹۱ از سایر روش‌ها بالاتر است. متغیر بودن دقت روش‌های مورد استفاده در این مطالعه را می‌توان ناشی به وسعت سطح مورد مطالعه نسبت داد. با توجه به نتایج حاصله، برای تعیین سطح زیر کشت برنج و تهیه نقشه کشت، از روش RF-NDVI استفاده شد. این مورد را می‌توان به شاخص NDVI نسبت داد که قادر است تا برنج را از کلاس‌های دیگر طبقه‌بندی نظیر خاک لخت، نواحی شهری، پیکره‌های آبی و درختان و نواحی جنگلی متمایز کند. همچنین کاهش مقادیر NDVI در مراحل نهایی رشد گیاه پیش از برداشت، به تشخیص برنج از سایر گیاهان علفی منجر شد.

جدول ۳- میزان ضریب کاپا و صحت کل روش‌های مختلف مورد استفاده

| روش | ضریب کاپا | صحت کل |
|---|---|---|
| ML | 0.89 | 0.91 |
| CART | 0.75 | 0.83 |
| RF | 0.79 | 0.86 |
| SVM | 0.56 | 0.70 |
| GME | 0.70 | 0.80 |
| RF-NDVI | 0.90 | 0.94 |

شکل ۶ نقشه کاربری اراضی استان گیلان با استفاده از شاخص RF-NDVI و جدول ۴ مقادیر سطح زیر کشت استان و شهرستان‌های مختلف آن را به روش RF-NDVI نشان می‌دهد. بر این اساس سطح کل شالیزارهای استان گیلان ۲۲۹۶۵۱ هکتار برآورد شده است که در مقایسه با آمارهای موجود شرکت آب منطقه‌ای (۲۴۵۰۰۰ هکتار) ۶/۲۷٪ و آمار سازمان جهاد کشاورزی استان (۲۳۸۰۱۲ هکتار) ۳/۵۲٪ کمتر است. در مجموع با در نظر گرفتن حدود ۵ درصد برای پرت تأسیسات، سطح کل شالیزارهای استان معادل ۲۱۸۱۳۵ هکتار برآورد شده است. شهرستان‌های رشت با مجموع ۵۵۷۹۹ هکتار، صومعه‌سرا با ۲۶۸۱۹ هکتار و آستانه اشرفیه با ۲۱۰۶۳ هکتار، بالاترین میزان سطح زیر کشت برنج در استان را به خود اختصاص دادند که در مجموع حدود ۴۵ درصد شالیزارهای استان است.




**شکل ۶- نقشه کاربری اراضی استان گیلان در سال ۱۳۹۷ با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی NDVI-RF**

**جدول ۴- برآورد مقادیر سطح زیر کشت استان و شهرستان‌های مختلف به روش RF-NDVI**

| شهرستان | پژوهش حاضر | | سایر منابع | |
|---|---|---|---|---|
| | سطح کل | سطح خالص* | سازمان جهاد کشاورزی** | سازمان آب منطقه‌ای** |
| املش | 3076 | 2922 | 3500 | 3500 |
| آستانه اشریفه | 22171 | 21063 | 23372 | 24000 |
| آستارا | 3394 | 3224 | 3200 | 3200 |
| بندر انزلی | 6330 | 6013 | 4976 | 4900 |
| فومن | 14851 | 14108 | 13870 | 14200 |
| لاهیجان | 18160 | 17252 | 23816 | 23800 |
| لنگرود | 9960 | 9462 | 9100 | 9500 |
| ماسال | 8111 | 7705 | 7000 | 7200 |
| رشت | 58736 | 55799 | 62338 | 62700 |
| رضوانشهر | 9779 | 9290 | 10000 | 10000 |
| رودبار | 2554 | 2427 | 3375 | 3700 |
| رودسر | 11829 | 11238 | 10700 | 10700 |
| شفت | 13324 | 12658 | 14330 | 18600 |
| سیاهکل | 4173 | 3965 | 4430 | 4700 |
| صومعه سرا | 28230 | 26819 | 28018 | 28000 |
| تالش | 14973 | 14190 | 15987 | 16300 |
| کل | 229651 | 218135 | 238012 | 245000 |

*: ۹۵ درصد کل درنظر گرفته شده است

**: سطح کل است

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش از چند روش طبقه‌بندی نظارت شده برای تعیین بهترین روش جهت پهنه‌بندی اراضی شالیزاری استان گیلان استفاده شد. دو معیار ضریب کاپا و صحت کل جهت برآورد دقت سطح زیر کشت نقشه اراضی

لازم به ذکر است که با توجه به اینکه این پروژه در سطح بسیار وسیع استانی انجام شده است، دقت نهایی طرح مناسب است. کاهش محسوس در مقدار سطح زیر کشت هر شهرستان می‌تواند ناشی از تغییر کاربری از شالیزار به سایر کاربری‌ها مانند ساختمان باشد.

شالیزار به کار رفت که نتایج نشان داد علیرغم وجود برخی عوامل مؤثر بر دقت طبقه‌بندی (مانند شباهت پوشش گیاهی علفی و کشت برنج) روش RF-NDVI با صحت کل ۹۴ درصد و ضریب کاپا ۰/۹۰ بالاترین دقت را در راستای رسیدن به هدف پژوهش دارد. اطلاعات موجود در تصاویر بدست آمده از ماهواره سنتینل ۲ پس از پردازش در محیط GEE با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی با شاخص NDVI نشان می‌دهد که این روش به خوبی می‌تواند اراضی شالیزار را از مزارع غیر شالیزار جدا کند. این مقادیر حتی اگر با مقادیر بدست آمده در مطالعات دیگر اختلاف داشته باشند، اما با توجه به پیچیدگی در سیستم کشاورزی محلی و سنتی مرسوم در منطقه می‌توانند رضایت‌بخش باشند و روش ارائه شده در این پژوهش می‌تواند آمار قابل اعتمادی را در سطح محلی و منطقه‌ای در اختیار تصمیم‌گیرندگان و برنامه ریزان قرار دهد. لازم به ذکر است هرچند این روش می‌تواند مزارع برنج را به خوبی استخراج کند، اما این دقت هنوز جای کافی ندارد. همچنین می‌توان به عنوان گام بعدی حاصل از این تحقیق علاوه بر شاخص گیاهی NDVI از ترکیب شاخص‌های گیاهی بیشتری نظیر SAVI، WAVI،EVI و LSWI برای تهیه نقشه‌ها استفاده کرد تا دقت نتایج خروجی افزایش یابد.

## فهرست منابع


۱. بنیاد، ا. و حاجی قادری، ط. ۱۳۸۶. تهیه نقشه جنگل‌های طبیعی استان زنجان با استفاده از داده‌های سنجنده +ETM ماهواره لندست ۷. نشریه تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی، ۱۱ (۴۲): ۶۲۷-۶۳۸.

۲. درودیان، ح. و درودیان، ع.۱۳۹۶. پیامدهای اجتماعی و بوم‌شناختی تغییر بی‌رویه کاربری اراضی کشاورزی. مدیریت اراضی، ۵ (۲): ۹۷-۸۱.

۳. ریاحی، و.، ضیاییان فیروزآبادی، پ.، عزیزپور، ف. و دارویی، پ. ۱۳۹۸. تعیین و بررسی سطح زیرکشت محصولات زراعی در ناحیه لنجانات با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای. تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی (علوم جغرافیایی)، ۱۹(۵۲)، ۱۶۹-۱۴۷.

۴. عبیات، د.، عبیات، م. و عبیات، م. ۱۴۰۱. بررسی کارایی روش‌های طبقه‌بندی و شاخص‌های طیفی در برآورد سطح زیرکشت محصولات زراعی شهرستان شوش. آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۳۶ (۴)، ۵۰۹-۴۹۳.

۵. علیپور، ف.، آق‌خانی، م.، عباس‌پور فرد، م.ح. و سپهر، ع. ۱۳۹۳. تفکیک محدوده و تخمین سطح زیر کشت محصولات کشاورزی به کمک تصاویر ماهواره‌ای. ماشین‌های کشاورزی، ۴(۲)، ۲۵۴-۲۴۴.

۶. فیضی‌زاده، ب.، خدمت‌زاده، ع. و نیک‌جو، م. ۱۳۹۷. ریز طبقه‌بندی اراضی باغی و زراعی با استفاده از تکنیک‌های پردازش شی پایه و الگوریتم‌های فازی با هدف تخمین سطح زیر کشت. تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی (علوم جغرافیایی)، ۱۸(۴۸)، ۲۱۶-۲۰۱.

۷. وزارت جهاد کشاورزی، ۱۴۰۲. آمارنامه کشاورزی (جلد اول: محصولات زراعی). معاونت برنامه‌ریزی اقتصادی، مرکز آمار، فناوری اطلاعات و ارتباطات.

8. Asmar, E., Vahidnia, M.H., Rezaei, M. and Amiri, E. 2024. Remote sensing-based paddy yield estimation using physical and FCNN deep learning models in Gilan province, Iran. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 34, 101199.

9. Chen, B., Xiao, X., Li, X., Pan, L., Doughty, R., Jinwei Dong, J.M., Qin, Y., Zhao, B., Wu, Z., Sun, R., Lan, G., Xie, G., Clinton, N. and Giri, C. 2017. A Mangrove Forest Map of China in 2015: Analysis of Time Series Landsat 7/8 and Sentinel-1A Imagery in Google Earth Engine Cloud Computing Platform. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 131, 104-120.
10. Dong, J. and Xiao, X. 2016. Evolution of regional to global paddy rice mapping methods: A review. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 119, 214–227.
11. Fatchurrachman, Rudiyanto, Soh, N., Shah, R.M., Giap, S.G.E., Setiawan, B.I. and Minasny, B. 2022. High-Resolution Mapping of Paddy Rice Extent and Growth Stages across Peninsular Malaysia Using a Fusion of Sentinel-1 and 2 Time Series Data in Google Earth Engine. Remote Sensing. 14 (8), 1-22.
12. Gascon, F, Bouzinac, C, Thépaut, O, Jung, M, Francesconi, B, Louis, J, Lonjou, V, Lafrance, B, Massera, S, Gaudel-Vacaresse, A. 2017. Copernicus Sentinel-2A Calibration and Products Validation Status. Remote Sensing. 9 (6): 584.
13. Geli, Z., Xiangming, X., Jinwei, D., Weili, K., Cui, J., Yuanwei, Q., Yuting, Z., Jie, W., Michael, A.M., and Chandrashekhar, B. 2015. Mapping paddy rice planting areas through time series analysis of MODIS land surface temperature and vegetation index data. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 1 (106), 156–171.
14. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M. And Ilyushchenko, S. 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale Geospatial Analysis for Everyone, Remote Sensing of Environment, 202 (1), 18-27.
15. Hudait, M. and Patel, P.P. 2022. Crop-type mapping and acreage estimation in smallholding plots using Sentinel-2 images and machine learning algorithms: Some comparisons. Remote Sensing and Space Science, 25 (1): 147-156.
16. Igué, A.M., Houndagba, C.J., Gaiser, T. and Stahr, K. 2012. Accuracy of the Land Use/Cover classification in the Oueme Basin of Benin (West Africa). International Journal of AgriScience, 2(2): 174-184.
17. Jaafari, S.H., and Nazarisamani, A.A. 2013. Comparison between land use/land cover mapping through Landsat and Google Earth imagery. American-Eurasian Journal of Agriculture & Environment Science, 13 (6): 763-768.
18. Jin, X., Li, Z., Feng, H., Ren, Z. and Li, S. 2020. Deep neural network algorithm for estimating maize biomass based on simulated sentinel 2A vegetation indices and leaf area index. The Crop Journal, 1 (8), 87–97.
19. Latham, J. 2009. FAO Land Cover Mapping Initiatives. In Proceedings of the North American Land Cover Summit, Washington, DC, USA, 20–22. Environment and Natural Resources Service of the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO): Rome, Italy, 75–95.
20. Li, Y., Li, X., Zhang, Y., Peng, D. and Bruzzone, L. 2023. Cost-efficient information extraction from massive remote sensing data: When weakly supervised deep learning meets remote sensing big data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 120, 103345.
21. Lillesand, T., Kiefer, R.W. and Chipman, J. 2004. Remote Sensing and Image Interpretation. John Wiley and Sons. New York, p. 720.
22. Liu, X., Hu, G., Chen, Y., Li, X., Xu, X., Li, S,. Pei, F. and Wang, S. 2018. High-Resolution Multi-Temporal Mapping of Global Urban Land Using Landsat Images Based on the Google Earth Engine Platform. Remote Sensing of Environment, 209, 227-239.
23. Lu, D., Moran, E. and Batistella. M. 2003. Linear mixture model applied to Amazonian vegetation classification. Remote Sensing of Environment. 87: 456-469.

24. Moussavi, S.A., Abbaszadeh Tehrani, N., and Janalipour, M. 2020. Estimation of wheat area cultivation using Sentinel 2 satellite images, Case study: Sojasroud Region, Khodabandeh City, Zanjan Province. Environmental Research and Technology, 7(7): 77-90.
25. Nguyen-Thanh, S., Chi-Farn, C., Cheng-Ru, C. and Horng-Yuh, G., 2020. Classification of multitemporal Sentinel-2 data for field-level monitoring of rice cropping practices in Taiwan. Adv. Space Res. 1, 65.
26. Nyaga, J.W., Markert, K.N., Thomas, A.B., Mugo, R.M., Wahome, A.M. and Irwin, D. 2019. Water Quality Monitoring of In Land Lakes in East Africa. AGUFM, 40 (1), 1-7.
27. Pageot, Y., Baup, F., Inglada, J., Baghdadi, N., and Demarez, V. 2020. Detection of irrigated and rainfed crops in temperate areas using Sentinel-1 and Sentinel-2 time series. Remote Sensing, 12(18): 3044.
28. Remy, F., Vincent, B., David, C. and Gerard, D. 2020. Combined use of multi-temporal Landsat-8 and Sentinel-2 images for wheat yield estimates at the intra-plot spatial scale. Agronomy, 1 (10), 327.
29. Rezaei, M., Shahnazari, A., Raeini Sarjaz, M. and Vazifedoust, M. 2016. Improving agricultural management in a large-scale paddy field by using remotely sensing data in the CERES-Rice model. Irrigation and drainage, 65: 224-228
30. Sarker, I.H. 2021. Machine Learning: Algorithms, Real-World Applications and Research Directions. SN Computer Science. 2 (160).
31. Soler-Perez-Salazar, M.J., Ortega-García, N., Vaca-Mier, M. and Cram-Hyedric, S. 2021. Maize and sorghum field segregation using multi-temporal Sentinel-2 data in Central Mexico. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1 (15), 024513.
32. Teluguntla, P., Thenkabail, P.S., Oliphant, A,. Xiong, J., Gumma, M.K., Congalton, R.G,. Yadav, K. and Huete, A. 2018. A 30-m Landsat-Derived Cropland Extent Product of Australia and China Using Random Forest Machine Learning Algorithm on Google Earth Engine Cloud Computing Platform, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 144, 325-340.
33. Thenkabail, P.; Lyon, J.G.; Turral, H. and Biradar, C. 2009. Remote Sensing of Global Croplands for Food Security; CRC Press: Boca Raton, FL, USA.
34. Verde, N.; Kokkoris, I.P.; Georgiadis, C.; Kaimaris, D.; Dimopoulos, P.; Mitsopoulos, I. and Mallinis, G. 2020. National Scale Land Cover Classification for Ecosystem Services Mapping and Assessment, Using Multitemporal Copernicus EO Data and Google Earth Engine. Remote Sens., 12 (20): 3303.
35. Xiong, J., Thenkabail, P., Gumma, M,. Teluguntla, P., Poehnelt, J., Congalton, R,. Kamini, Y. and Thau, D. 2017. Automated Cropland Mapping of Continental Africa Using Google Earth Engine Cloud Computing. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 126, 225-244
36. Zhang, B., Chen, Z., Peng, D., Benediktsson, J.A., Liu, B., Zou, L. and Li J. 2019. Plaza A. Remotely sensed big data: Evolution in model development for information extraction. Proceedings of the IEEE, 107 (12), 2294-2301.
37. Zhao, R.; Li, Y. and Ma, M. 2021. Mapping Paddy Rice with Satellite Remote Sensing: A Review. Sustainability.13 (2), 503.

پژوهش‌های خاک / الف / جلد ۳۸ / شماره۲ تابستان/ ۱۴۰۳/ ۱۴۶-۱۲۵
https://doi.org/10.22092/IJSR.2024.365017.738

# تاثیر کشت طولانی‌مدت پسته بر شکل‌های فسفر و برخی از ویژگی‌های خاک

فاطمه عباس زاده*، مجید حجازی مهریزی، ناصر برومند و هرمزد نقوی

دانشجوی دکتری علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ f.abbaszadeh@agr.uk.ac.ir

دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ mhejazi@uk.ac.ir

دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ nboroomand@uk.ac.ir

دانشیار، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمان، کرمان، ایران ؛ h.naghavi@areeo.ac.ir

« مقاله پژوهشی»

دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۹ و پذیرش:۱۴۰۳/۵/۲۴

## چکیده

**هدف این پژوهش بررسی تاثیر کشت طولانی مدت پسته بر شکل های فسفر معدنی خاک بود. ویژگی‌های خاک و نیز وضعیت فسفر از لحاظ شکل‌های فسفر معدنی به ویژه فسفر باقیمانده در عمق‌های مختلف در خاک های زیر کشت پسته در کرمان با اراضی بکر کنار آن مقایسه شد. برای این منظور نمونه‌برداری در سه تکرار از ۴ عمق خاک (۱۰-۰، ۲۰-۱۰، ۳۰-۲۰ و ۵۰-۳۰ سانتی متر) از اراضی زیر کشت پسته و بکر (منطقه فاقد کشت) به روش تصادفی- سیستماتیک انجام شد. برخی از ویژگی-های فیزیکی و شیمیایی خاک و شکل‌های فسفر در خاک اندازه‌گیری گردید و تجزیه داده‌ها با استفاده از آزمون واریانس یکطرفه انجام شد. نتایج نشان داد که به غیر از وزن مخصوص ظاهری، دیگر ویژگی‌های خاک در دو کاربری با هم تفاوت معنی‌داری داشتند. هدایت الکتریکی (EC ) خاک در اراضی پسته کمتر از زمین بکر بود ولی مقدار کربنات کلسیم و ماده آلی خاک در زمین کشت پسته بیشتر از زمین بکر بود. بررسی عمقی هر دو اراضی نشان داد که بیش‌ترین میزان کربنات کلسیم (۲۶/۲٪) و ماده آلی (۰/۹٪) در عمق ۲۰-۱۰ سانتی متری بود. بین دو کاربری از لحاظ شکل‌های فسفر معدنی نیز تفاوت معنی‌دار مشاهده شد. مقدار فسفر کل و فسفر قابل جذب خاک در اراضی پسته به ترتیب ۳٪ و ۳۷٪ بیشتر از زمین بکر بود. میزان فسفر باقیمانده خاک نیز در زمین کشت پسته(۱۴۶/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) نسبت به زمین بکر (۱۲۹/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بیشتر بود. با بررسی روند تغییرات عمقی مقدار فسفر باقیمانده، مشخص شد که مقدار آن در اعماق مختلف از روند ثابتی پیروی نمی‌کند. بیشترین مقدار فسفر باقیمانده در عمق ۲۰-۱۰ سانتی متری با مقدار ۱۵۴ میلی گرم بر کیلوگرم و کمترین مقدار آن در عمق ۱۰-۰ سانتی متری با مقدار ۱۱۷ میلی گرم بر کیلوگرم مشاهده شد. طبق نتایج به دست آمده، فسفر قابل استخراج با اسید در هر دو کاربری، شکل غالب فسفر معدنی بود. نتایج نشان داد که به منظور مدیریت صحیح فسفر در اراضی زیر کشت پسته، آگاهی از میزان شکل های فسفر از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد.**

**واژه‌های کلیدی:** خاک های شور، شکل های فسفر، فسفر باقیمانده، کاربری اراضی، مدیریت فسفر

* . آدرس ایمیل نویسنده مسئول:f.abbaszadeh@agr.uk.ac.ir

**مقدمه**

مطالعه تاثیر کاربری اراضی بر شاخص‌های کیفیت خاک از جمله وضعیت عناصر غذایی امکان شناسایی مدیریت‌های پایدار و به تبع آن پیشگیری از تخریب فزاینده خاک را فراهم می‌سازد. داشتن اطلاعات دقیق و کافی از وضعیت فسفر در مناطق خشک و نیمه-خشک جهت توسعه پایدار کشاورزی اهمیت ویژه‌ای دارد. فسفر از جمله عناصر ضروری گیاه می‌باشد که در خاک به شکل‌های آلی و معدنی وجود دارد. اگر چه شواهدی مبنی بر جذب شکل آلی فسفر نیز وجود دارد، اما عمده جذب فسفر توسط گیاه به شکل معدنی صورت می‌پذیرد(السن و سامرز، ۱۹۸۲). بر همین اساس آگاهی از وضعیت فسفر معدنی به ویژه شکل‌های آن در خاک می‌تواند حایز اهمیت باشد. بیش از ۶۰ درصد از اراضی تحت کشت ایران در زمره خاک‌های آهکی قرار می‌گیرند. در خاک‌های آهکی بخش عمده‌ای از فسفر محلول به وسیله جذب سطحی توسط کربنات‌ها در مدت کوتاهی به شکل‌های غیر قابل دسترس‌تر نظیر فسفات‌های کلسیم تبدیل می‌شود.

کشت طولانی‌مدت و فشرده سبب تغییر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک می‌شود(رضا پور و همکاران، ۲۰۱۳). در شناسایی مدیریت‌های پایدار و جلوگیری از تخریب روزافزون خاک، مطالعه تغییرات ویژگی‌های شیمیایی خاک در اثر کشت طولانی با هدف بهبود و حفظ کیفیت منابع اراضی می‌تواند بسیار موثر باشد(تقی‌پور و همکاران، ۱۳۹۴). صادقی‌میانرودی و همکاران(۱۴۰۰) در بررسی ویژگی‌های فیزیکی و عناصر غذایی دو کاربری نیشکر و بکر در شمال خوزستان، گزارش کردند که وزن مخصوص ظاهری خاک و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در زمین کشت نیشکر نسبت به زمین کشت نشده به ترتیب ۱۶ و ۶۷ درصد افزایش یافت. همچنین بیان داشتند که فسفر قابل جذب و ماده آلی در زمین نیشکر افزایش و نسبت کربن به نیتروژن و مقدار پتاسیم قابل جذب کاهش یافته است. کاربری اراضی با تأثیر بر برخی ویژگی‌های خاک مانند pH، ماده آلی، ساختمان و بافت می تواند سبب تغییرات در قابلیت استفاده عناصری مانند فسفر، نیتروژن، پتاسیم، منگنز، مس، آهن و روی گردد (جیانگ و همکاران، ۲۰۰۹). نتایج مطالعه مارانگویت و همکاران(۲۰۱۷) در خاک‌های مناطق استوایی، که با هدف بررسی اثرات کاربری اراضی بر بخش‌های فسفر غیرآلی و آلی خاک با در نظر گرفتن نقش ماده آلی در نگهداری فسفر انجام شد، نشان داد مقدار فسفر قابل دسترس و فسفر آلی با مقدار کربن آلی همبستگی مثبت دارند که نشان از نقش کلیدی ماده آلی در افزایش فسفر قابل دسترس خاک دارد. در مطالعه خاک‌های برزیل که توسط سلطان قیسی و همکاران(۲۰۱۹) صورت گرفت، نشان داده شد که فعالیت آنزیم فسفاتاز خاک می‌تواند به عنوان شاخصی جهت ارزیابی وضعیت تغذیه‌ای فسفر خاک مورد استفاده قرار بگیرد اما محدوده آن با توجه به کاربری اراضی تغییر می-کند.

مقدار فسفر کل، اطلاعات بسیار اندکی در ارتباط با رفتار شیمیایی فسفر در خاک ارائه می‌دهد در حالی‌که شکل‌های مختلف فسفر به شکل بهتری می‌توانند انتقال و سرنوشت فسفر در خاک را نشان دهند. جزءبندی اشکال فسفر می‌تواند پتانسیل جذب و رها سازی فسفر از خاک را به طور دقیق‌تری توصیف کند(وانگ و همکاران، ۲۰۰۶). با شناخت شکل‌های مختلف فسفر و تعیین مقدار آن‌ها، می-توان در ارزیابی حاصلخیزی خاک از آنان کمک گرفت(مکسنر و همکاران، ۱۹۸۵). مطالعات نشان می‌دهد که تعدادی از فرآیندهای غیرزیستی و زیستی توزیع شکل-های فسفر را در خاک کنترل می‌کنند و به همین دلیل تنوع قابل‌توجهی در مقدار شکل‌های فسفر در اراضی با کاربری مختلف دیده می‌شود(استاتر و همکاران، ۲۰۱۵). در مطالعه انجام شده توسط عبدالجلیل(۲۰۰۵) بیان شده است که شکل‌های مختلف فسفر خاک توسط هیدرولوژی، منابع ذاتی و رفتار ژئوشیمیایی خاک کنترل می‌شود. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که در خاک‌های مورد مطالعه فسفر متصل به آلومینیم و آهن و فسفر قابل استفاده به راحتی جذب گیاه می‌شوند در حالی‌که فسفر باقیمانده و فسفر

متصل به کلسیم قابلیت دسترسی کمتری برای گیاه دارند. مومنی و همکاران(۱۳۸۷) اثر چرای مفرط در کاربری‌های مختلف را بر میزان هدر رفت برخی از شکل‌های فسفر خاک بررسی کردند. نتایج آنان نشان داد که تخریب پوشش گیاهی تأثیر قابل توجهی بر مقدار ذخایر فسفر خاک دارد. آن‌ها بیان داشتند که در اثر تخریب مراتع شکل‌های آلی فسفر نسبت به شکل های معدنی تغییر بیشتری داشتند، به طوری‌که در کاربری دیمزار نسبت به مرتع با پوشش گیاهی نسبتاً خوب شکل های آلی لبایل، نسبتاً لبایل و غیر لبایل فسفر به ترتیب ۷۲/۳، ۲۴/۳ و ۷/۱ درصد کاهش یافت. تجری و همکاران(۱۳۹۴) بیان کردند که مقادیر فسفر کل و کل فسفر آلی در اراضی جنگل نسبت به اراضی کشاورزی کاهش و در مقابل کل فسفر معدنی و شکل‌های مختلف فسفر معدنی افزایش یافت.

با وجود آن که سطح بسیار زیادی از اراضی بخش شمال غربی استان کرمان تحت کشت پسته می‌باشد اما تاکنون مطالعات مدونی در ارتباط با وضعیت شکل‌های فسفر در اراضی پسته‌کاری وجود ندارد. در این پژوهش فرض شده که اراضی پسته‌کاری در مقایسه با اراضی بکر تغییرات قابل توجهی درخصوصیات خاک و به دنبال آن وضعیت فسفر به ویژه شکل‌های فسفر معدنی در خاک دارند. آگاهی از تغییر شکل‌های فسفر در خاک به ویژه فسفر باقی‌مانده می‌تواند در راستای مدیریت بهینه مصرف کودهای فسفری راهگشا باشد. بنابراین این پژوهش با هدف بررسی تاثیر کشت طولانی مدت پسته بر برخی ویژگی‌های خاک و نیز شکل های فسفر خاک در اعماق مختلف انجام گرفت.

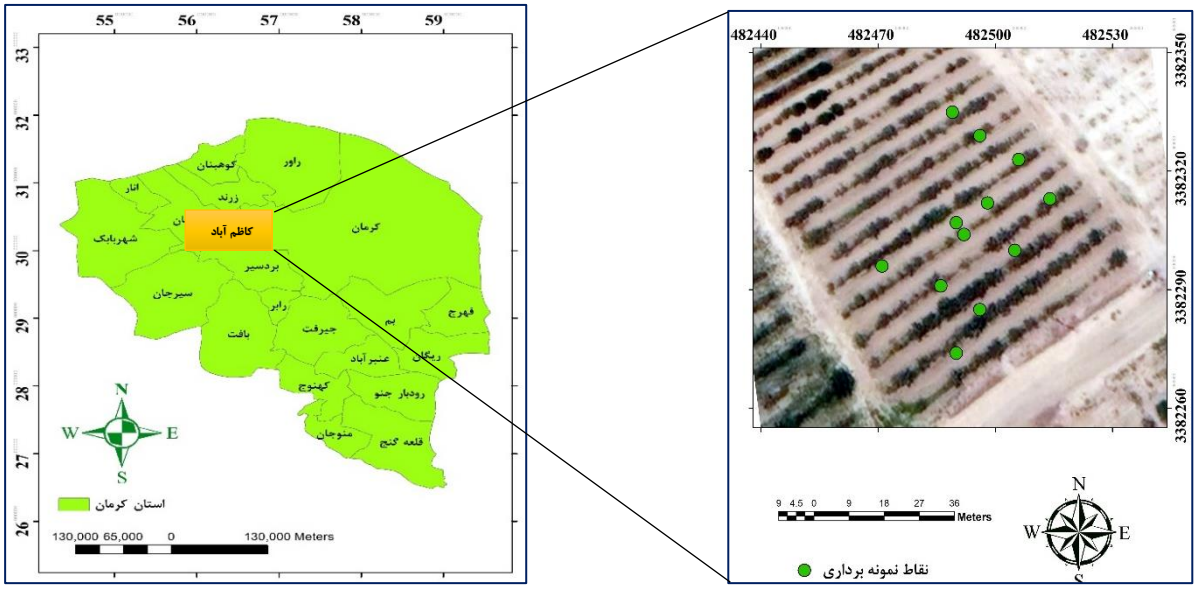
## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعاتی

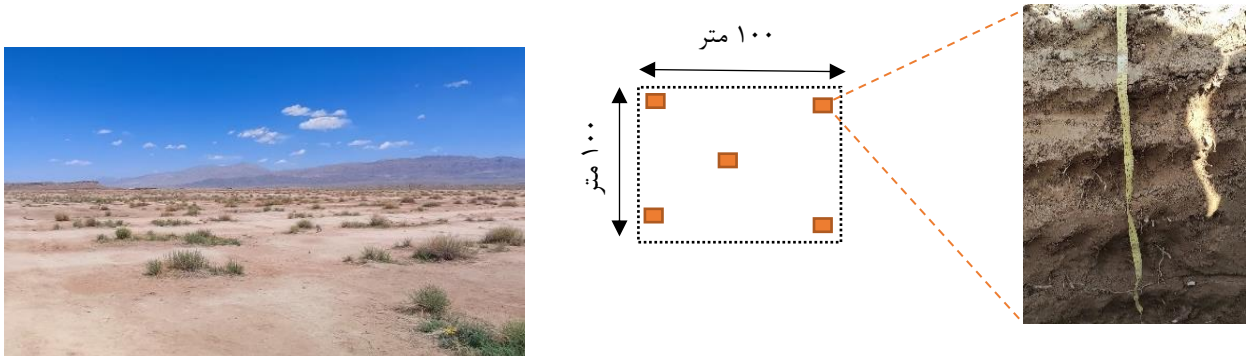
منطقه مورد مطالعه در بخش کاظم‌آباد در ۳۹ کیلومتری شمال غربی استان کرمان با مختصات جغرافیایی ۳۰ درجه و ۳۴ دقیقه و ۲۳ ثانیه عرض شمالی و ۵۶ درجه و ۴۹ دقیقه و ۴ ثانیه طول شرقی واقع شده است. متوسط ارتفاع از سطح دریا ۱۷۱۰متر و اقلیم آن معتدل و خشک می‌باشد. مواد مادری منطقه مورد مطالعه، غالبا آهکی است. منطقه تحت کشت پسته می‌باشد و رقم غالب پسته در این منطقه، اوحدی با سن متوسط ۳۰ سال می‌باشد(شکل ۱، الف).

### نمونه‌برداری

نمونه‌های خاک از چهار عمق (۱۰-۰، ۲۰-۱۰، ۳۰-۲۰ و ۵۰-۳۰ سانتی متری) از زمین تحت کشت پسته و زمین بکر مجاور آن (به عنوان نمونه شاهد که طی سالیان متمادی به صورت دست نخورده باقی‌مانده است) برداشت گردید. در زمین تحت کشت پسته نمونه‌برداری به صورت سیستماتیک و در سه تکرار از درختان پسته که در حد امکان یک دست باشند (از نظر رقم، سن، و شرایط رشدی) انجام شد (شکل ۱، الف). برای نمونه برداری از زمین بکر، ۵ سایت انتخاب و در هر سایت، یک قطعه مربع به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰ متر (۱ هکتار) ایجاد و پنج نقطه نمونه برداری در این مربع انتخاب شد. در هر نقطه، یک پروفیل به عمق ۵۰ سانتی متر (۵۰×۵۰ سانتی متر) حفر شد و نمونه های خاک در سه تکرار و از اعماق ذکر شده جمع آوری شدند (شکل ۱، ب). نمونه‌های برداشت شده هوا خشک و پس از عبور از الک ۲ میلی‌متری به آزمایشگاه انتقال یافتند.




ب




**شکل۱- الف) موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و پراکنش نقاط نمونه برداری در زمین تحت کشت پسته ب) منطقه بکر مجاور و نحوه نمونه برداری**

**تجزیه فیزیک و شیمیایی خاک**

برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نمونه-های خاک از جمله pH و EC در تعلیق ۱ به ۵ خاک به آب به ترتیب به وسیله pH متر و هدایت‌سنج، کربنات کلسیم معادل خاک به روش تیتراسیون برگشتی با اسید کلریدریک ۲ نرمال(اسمیت، ۱۹۹۱)، جرم مخصوص ظاهری با روش‌های کلوخه و پارافین(رینچ و گراسمن، ۲۰۰۲)، بافت خاک به روش هیدرومتر( بایوکاس، ۱۹۶۲)، کربن آلی به روش اکسایش تر(والکی و بلاک، ۱۹۳۴) و مقدار فسفر قابل جذب خاک از طریق استخراج با بیکربنات سدیم(السن، ۱۹۵۴) اندازه گیری شد. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه در دو منطقه در عمق ۵۰-۰ سانتی متری در جدول (۱) آمده است.

**جدول۱- برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه در عمق ۵۰-۰ سانتی‌متری**

| بافت خاک | جرم مخصوص ظاهری ($g/cm^3$) | ماده آلی (٪) | کربنات کلسیم معادل (٪) | EC (dS/m) | pH | کاربری اراضی |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Loam | ۱/۶۲ | ۰/۶۲ | ۲۹/۰۴ | ۵/۵۶ | ۷/۹۰ | زمین پسته |
| Sandy loam | ۱/۶۴ | ۰/۳۸ | ۲۴/۱۱ | ۹/۹۷ | ۷/۱۵ | زمین بکر (شاهد) |

## تعیین ذخایر فسفر کل و شکل‌های فسفر غیرآلی

جهت اندازه گیری فسفر کل از روش ساندرز و ویلیام اصلاح شده توسط والکر و آدامز(۱۹۵۸) استفاده شد. برای این منظور مقدار یک گرم از نمونه‌های خاک برداشت و پس از انتقال به کروزه‌های چینی در کوره حرارتی الکتریکی در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت دو ساعت قرار گرفت. پس از سرد شدن، نمونه خاک حرارت دیده شده با اسید سولفوریک یک نرمال به مدت ۱۶ ساعت تکان داده شد و مقدار فسفر در عصاره پس از سانتریفیوژ و عبور از کاغذ صافی به روش رنگ‌سنجی مورفی و رایلی(۱۹۶۵) تعیین شد. برای اندازه‌گیری کل فسفر معدنی، نمونه خاک با اسید سولفوریک ۱ نرمال به مدت ۱۶ ساعت تکان داده شد و مقدار فسفر در عصاره به روش رنگ سنجی تعیین شد. کل فسفر آلی نیز از تفاضل فسفر کل از کل فسفر غیرآلی محاسبه گردید.

برای جداسازی و تعیین شکل‌های فسفر معدنی خاک از روش استخراج متوالی هدلی و همکاران(۱۹۸۲) اصلاح شده توسط سویی و همکاران(۱۹۹۹) استفاده شد(جدول ۲). برای این منظور عصاره‌گیری متوالی از خاک با ۳۰ میلی‌لیتر آب مقطر[۱]، بیکربنات سدیم نیم مولار تنظیم شده در pH=8.2[۲]، سود ۰/۱ مولار[۳] برای استخراج فسفر پیوند یافته با آهن و آلومینیوم، اسید کلریدریک یک مولار[۴] برای استخراج فسفر پیوند یافته با کلسیم و اسید سولفوریک و آب اکسیژنه (۳۰٪)[۵]جهت استخراج مقدار فسفر باقیمانده انجام و پس از سانتریفیوژ و عبور از کاغذ صافی، فسفر موجود در عصاره‌ها بر اساس روش رنگ‌سنجی مورفی و رایلی(۱۹۶۵) و با کمک دستگاه اسپکتروفوتومتر در طول موج ۸۸۰ نانومتر قرائت شد. ذخایر فسفر[۶] بر حسب کیلوگرم در هکتار برای هر عمق با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد(مارانگویت و همکاران، ۲۰۱۷):

$$s = x \times \rho \times z$$ رابطه (۱)

که در آن S مقدار ذخایر فسفر برای اعماق ثابت و (x) محتوای فسفر خاک در عمق تعیین شده (z) و ρ چگالی ظاهری خاک است.

**جدول ۲- مراحل و شرایط تعیین شکل‌های فسفرمعدنی در خاک(هدلی و همکاران، ۱۹۸۲)**

| مرحله | محلول عصاره‌گیر | زمان تعادل | شکل شیمیایی فسفر |
|---|---|---|---|
| ۱ | آب مقطر | ۱۶ ساعت | فسفر محلول |
| ۲ | بیکربنات سدیم ۰/۵ مولار | ۱۶ ساعت | فسفر قابل دسترس |
| ۳ | سدیم هیدروکسید ۰/۱ مولار | ۱۶ ساعت | فسفات‌های آهن و آلومینیم |
| ۴ | اسیدکلریدریک ۱ مولار | ۱۶ ساعت | فسفات‌های کلسیم و کربناتی |
| ۵ | اسیدسولفوریک + آب اکسیژنه | ۲ ساعت | فسفر باقیمانده |

[۱] - $H_2O$-P

[۲] $NaHCO_3$-P

[۳] -NaOH-P

[۴]- HCl-P

[۵] -$H_2O_2$-$H_2SO_4$-P

[۶] - P-stocks

## تجزیه و تحلیل آماری

قبل از تجزیه واریانس داده‌ها، همگنی و نرمال بودن هر یک از پارامترها با استفاده از آزمون کولموگراف-اسمیرنوف بررسی شد. سپس با استفاده از مدل ANOVA یک‌طرفه تاثیر کاربری اراضی بر گونه‌های فسفر و برخی از خصوصیات خاک در چهار عمق مورد بررسی قرار گرفت. همبستگی ساده بین خصوصیات خاک و شکل‌های فسفر توسط نرم افزارSPSS v.26 مورد بررسی قرار گرفت. تجزیه‌های آماری در سطح یک درصد به وسیله نرم افزار SAS v.26 انجام و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون دانکن در سطح ۵ درصد بهره گرفته شد.

## نتایج و بحث

### اثر نوع کاربری اراضی بر خصوصیات خاک

#### pH خاک

نتایج نشان داد که اختلاف بین دو کاربری پسته و زمین بکر مجاور از لحاظ pH معنی‌دار نمی‌باشد(جدول ۳). همچنین با افزایش عمق نیز تغییر معنی‌داری در pH خاک مشاهده نشد(جدول ۴) و از یک روند ثابتی پیروی کرد(شکل ۲). به نظر می‌رسد آهکی بودن خاک و بالابودن ظرفیت بافری خاک منطقه مورد مطالعه سبب شده که تغییرات pH بین کاربری‌های مورد مطالعه معنی‌دار نباشد. در ارتباط با تأثیر کاربری اراضی بر pH نتایج ضد و نقیضی وجود دارد. کرمی و همکاران(۱۳۹۹) نشان دادند که میزان pH خاک در اراضی زراعی نسبت به مرتع بیشتر است. لیزاگا و همکاران (۲۰۱۹) بیان کردند pH خاک‌های کشاورزی نسبت به مرتع بالاتر است. در مقابل لندی و همکاران(۱۳۹۷) گزارش کردند که کشت مستمر نیشکر بر میزان pH خاک‌های کشت و صنعت شده نیشکر اثر معنی-داری ندارد.

**جدول ۳- ویژگی های فیزیکوشیمیایی خاک های مورد مطالعه در دو کاربری مورد مطالعه**

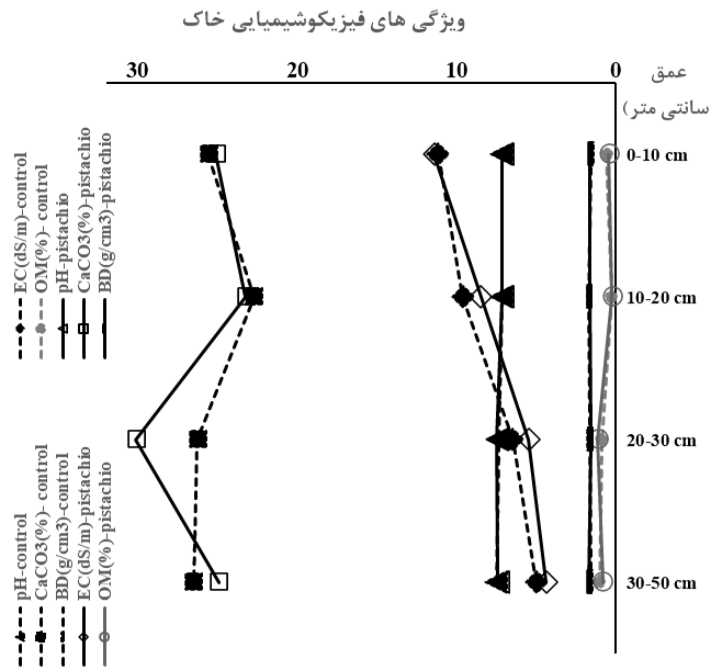
| کاربری اراضی | ویژگی های شیمیایی و فیزیکی خاک | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | pH | EC | کربنات کلسیم معادل | ماده آلی | جرم مخصوص ظاهری |
| زمین پسته | ۷/۴۶[a] | ۴/۹۹[b] | ۲۷/۱۵[a] | ۰/۹۶[a] | ۱/۶۲[a] |
| زمین بکر | ۷/۱۴ [b] | ۹/۹۶[a] | ۲۴/۱۰[b] | ۰/۳۸[b] | ۱/۶۴[a] |

***در هر ستون میانگین های دارای حروف متفاوت بر اساس آزمون Duncan در سطح ۵٪ دارای اختلاف معنی داری می‌باشند.**

**جدول ۴- ویژگی های فیزیکوشیمیایی خاک های مورد مطالعه در اعماق مختلف نمونه برداری**

| عمق | pH | EC | کربنات کلسیم معادل | ماده آلی | جرم مخصوص ظاهری |
|---|---|---|---|---|---|
| ۱۰-۰ | ۷/۲۱ [a] | ۹/۷۸ [a] | ۲۵/۹۲ [a] | ۰/۵۴ [b] | ۱/۵۵ [c] |
| ۲۰-۱۰ | ۷/۲۹ [a] | ۸/۷۵ [b] | ۲۶/۲۱ [a] | ۰/۷۹ [a] | ۱/۶۴ [b] |
| ۳۰-۲۰ | ۷/۳۱ [a] | ۷/۲۳ [c] | ۲۵/۲۱ [a] | ۰/۵۹ [ab] | ۱/۶۵ [b] |
| ۵۰-۳۰ | ۷/۲۵ [a] | ۶/۴۹ [d] | ۲۴/۱۷ [a] | ۰/۵۱ [b] | ۱/۷۱ [a] |

***در هر ستون میانگین های دارای حروف متفاوت بر اساس آزمون Duncan در سطح ۵٪ دارای اختلاف معنی داری می‌باشند.**




**شکل ۲-تغییرات عمقی ویژگی های خاک در دو کاربری مورد مطالعه**

## EC خاک

بین کاربری اراضی پسته کاری و بکر از لحاظ قابلیت هدایت الکتریکی خاک تفاوت معنی‌دار($P<0.05$) مشاهده شد(جدول ۳). میزان EC در زمین بکر(۹/۹۶ دسی زیمنس بر متر) بیشتر از زمین تحت کشت پسته(۴/۹۹ دسی زیمنس بر متر) بود. لازم به ذکر است که به طور کلی در مناطق کویری به دلیل تبخیر زیاد میزان شوری خاک بالا بوده و به همین دلیل بالا بودن هدایت الکتریکی در کاربری مرتع دور از انتظار نیست. عواملی مانند آبیاری، آبشویی اولیه، ایجاد شبکه زهکشی می‌توانند از جمله دلایل کاهش شوری در زمین‌های زیر کشت پسته نسبت به زمین بکر باشد. این نتایج با یافته های رئیسی(۲۰۱۷) که میزان هدایت الکتریکی را در زمین‌های کشاورزی کمتر از مراتع بکر گزارش کرد مطابقت دارد. بین عمق‌های مختلف از نظر میزان EC تفاوت معنی‌دار مشاهده شد(جدول۴) و روند تغییرات آن با عمق به صورت کاهشی بود(شکل ۲). با افزایش عمق EC خاک از ۹/۷۸ در عمق ۱۰-۰ سانتی متری به ۶/۴۹ دسی زیمنس بر متر در عمق ۵۰-۳۰ سانتی متری کاهش یافت. این نتایج می‌تواند بیانگر حرکت املاح از پایین به سمت سطح خاک باشد. نورمندی‌پور و همکاران(۱۳۹۲) در پژوهش خود به افزایش عمقی EC در اراضی تحت کشت پسته اشاره کردند و دلیل آن را شستشوی نمک‌های محلول از افق‌های بالایی و تجمع آن در افق‌های پایینی دانستند. آن‌ها همچنین مشاهده کردند که در اراضی بکر مجاور، تغییرات عمقی EC به صورت کاهشی بود که دلیل آن را عدم آبیاری و حرکت رو به بالای املاح ذکر کردند.

## کربنات کلسیم معادل خاک

نتایج نشان داد که میزان کربنات کلسیم معادل به طور معنی‌داری از ۲۴/۱۰ درصد در اراضی بکر به ۲۷/۱۵ درصد در خاک‌های تحت کشت پسته افزایش یافته است(جدول ۳). دلیل این روند افزایشی در خاک های تحت کشت پسته می‌تواند ناشی از شستشوی کربنات کلسیم از لایه بالایی به لایه زیرین بوده و یا احتمالا به دلیل بالاتر بودن میزان آهک در خاک های تحت کشت پسته نسبت به اراضی بکر، فرسایش شدید خاک سطحی حاوی مقادیر بالای مواد آلی و انتقال این مواد، سبب قرار گرفتن لایه زیرین غنی از کربنات کلسیم(جنس مواد مادری منطقه) در سطح شده باشد(وفایی زاده و همکاران، ۱۳۹۵). بررسی تغییرات عمقی کربنات کلسیم معادل معنی دار نبود(جدول

۴) اما روند تغییرات آن با افزایش عمق روند کاهشی داشته است به طوریکه مقدار این ویژگی در افق سطح برابر با۲۶/۲۱ درصد اندازه‌گیری شد و با افزایش عمق به ۵۰-۳۰ سانتی مقدار کربنات کلسیم به ۲۴/۱۷ درصد رسید(شکل۲). مظفری و همکاران(۱۳۹۷) نیز بیان کردند که میزان کربنات کلسیم در اراضی یونجه نسبت به اراضی معمولی بیشتر است و دلیل آن را چنین توصیف کردند که با توجه به نزدیکی فاصله نقاط نمونه‌برداری، نقاط دارای ماده مادری یکسانی بوده، و بنابراین تغییر در میزان کربنات کلسیم را به تغییر کاربری اراضی مرتبط دانستند.

## ماده‌آلی

نتایج مقایسه میانگین درصد ماده آلی، در دو کاربری کشت پسته و زمین بکر مجاور نشان داد که بین دو منطقه اختلاف معنی‌داری از نظر آماری وجود دارد(جدول ۳). همچنین تغییر معنی داری با افزایش عمق مشاهده شد(جدول۴) و با بررسی روند تغییرات عمقی، روند کاهشی مشاهده شد(شکل ۲). درصد ماده آلی در زمین کشت پسته (۰/۹۶ درصد) بیشتر از زمین بکر (۰/۳۸ درصد) بود. دلیل این افزایش می‌تواند نتیجه اعمال مدیریت کشت در این منطقه باشد. به طور کلی در مناطق خشک و نیمه خشک و در خاک‌های بکر، به دلیل فقر ماده‌آلی، کشت و کار همراه با آبیاری می‌تواند از دلایل افزایش مقدار ماده آلی خاک باشد(جعفری و همکاران، ۱۳۹۵). بیشترین درصد ماده آلی در عمق ۲۰-۱۰ سانتی متری(۰/۷۹ درصد) مشاهده شد. حضور ریشه پسته و ترشحات آن در مراحل مختلف رشد، می‌تواند سبب افزایش کربن آلی در خاک شود. کمترین میزان ماده آلی در عمق ۵۰-۳۰ سانتی متری با ۰/۵۱ درصد مشاهده شد که بین این عمق و سایر اعماق(۱۰-۰ و ۳۰-۲۰ سانتی متری) تفاوت معنی داری مشاهده نشد. چیبسا و همکاران(۲۰۰۹) در مطالعات خود بیان داشتند که از نظر درصد ماده‌آلی خاک لایه‌های سطحی شرایط مناسب‌تری در مقایسه با لایه‌های تحتانی دارند. کشت و کار موجب افزایش تجزیه مواد آلی خاک طی عملیات شخم می‌شود که این امر مهمترین عامل در تسریع کاهش ماده آلی در خاک است(سیکس و همکاران، ۲۰۰۰). همچنین شکسته شدن خاکدانه ها و قرار گرفتن مواد آلی در معرض حمله میکروبی در اثر عملیات کشت و کار، یکی دیگر از دلایل کاهش مقدار ماده آلی می باشد.

## جرم مخصوص ظاهری

بین دو کاربری کشت پسته و زمین بکر از لحاظ جرم مخصوص ظاهری خاک تفاوت معنی دار مشاهده نشد(جدول ۳). اما تغییرات عمقی جرم مخصوص ظاهری تفاوت معنی داری در سطح ۵ درصد نشان داد(جدول ۴). همچنین روند تغییرات عمقی نشان داد که با افزایش عمق، مقدار جرم مخصوص ظاهری به طور منظم افزایش می یابد. به طوریکه بیشترین مقدار جرم مخصوص ظاهری در عمق ۵۰-۳۰(۱/۷۱) و کمترین مقدار آن در عمق ۱۰-۰ سانتی متری(۱/۵۵) مشاهده شد(شکل ۲). دلیل این امر می‌تواند ناشی از کمتر بودن ماده آلی در افق‌های پایینی نسبت به افق‌های سطحی باشد. کلیک و همکاران(۲۰۰۵) در مطالعات خود بیان کردند خاکدانه‌ها در اثر کاهش ماده آلی به راحتی شکسته و در طی فرسایش آبی ذرات ریز خاک حمل شده و در خلل و فرج خاک قرار می‌گیرند، در نتیجه خلل و فرج خاک در اثر تخریب ساختمان کاهش یافته و جرم مخصوص ظاهری افزایش می‌یابد. حاج عباسی و همکاران(۱۳۸۶) نیز در مطالعات خود تغییر معنی‌داری در جرم مخصوص ظاهری خاک در کاربری های مختلف مشاهده نکردند.

## تاثیر کاربری اراضی بر فسفر معدنی، فسفر آلی و فسفر کل خاک

### فسفر معدنی کل

نتایج نشان داد که کل فسفر معدنی خاک تحت تاثیر نوع کاربری قرار نگرفت(جدول ۵). اما مقدار کل فسفر معدنی در خاک های تحت کشت پسته(۳۳۳/۳۹ میلی‌گرم

بر کیلوگرم) بیشتر از خاک های بکر(۳۲۹/۴۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) مشاهده شد. تجری و همکاران(۱۳۹۴) نیز دلیل افزایش فسفر معدنی کل را معدنی‌شدن فسفر آلی در طی کشت و کار بیان کردند. در بین عمق‌های مورد بررسی، به غیر از عمق ۱۰ تا ۲۰ و۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متر از لحاظ فسفر معدنی تفاوت معنی‌دار مشاهده شد(جدول ۶). همچنین روند تغییرات عمقی کل فسفر معدنی به صورت افزایشی بود(شکل۳). بیش ترین مقدار کل فسفر معدنی(۳۶۶/۵۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در عمق ۵۰-۳۰ سانتی متری و کمترین مقدار آن(۳۰۵/۶۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در عمق ۱۰-۰ سانتی متری مشاهده شد. به نظر می‌رسد در سطح خاک به دلیل حضور ماده آلی، فسفر بیشتر به شکل فسفر آلی تجمع یافته باشد(بریدی و همکاران، ۲۰۰۸). با ارزیابی اکوسیستم‌های کشاورزی یکساله و چندساله که توسط دی اسیس و همکاران(۲۰۱۰) انجام شده است، مشخص شد که عملیات کشت و کار از طریق افزایش فسفر معدنی، دینامیک فسفر را تحت تاثیر قرار می‌دهد. آنان بیان داشتند که در خاک‌های زیر کشت اختلاط بقایای گیاهی با خاک می‌تواند فسفر آلی و سپس فسفر معدنی از طریق معدنی شدن افزایش دهد. آنان عوامل موثر در معدنی شدن فسفر آلی را رطوبت، شخم و درجه حرارت برشمردند.

**جدول ۵- میزان فسفر کل معدنی و آلی و فسفر کل در دو کاربری مورد مطالعه**

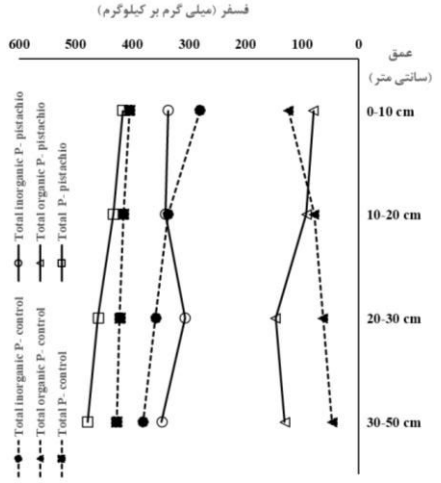
| کاربری اراضی | فسفر معدنی کل | فسفر آلی کل | فسفر کل |
|---|---|---|---|
| زمین پسته | ۳۳۳/۳۹ a | ۱۱۴/۱۲ a | ۴۳۸/۰۸ a |
| زمین بکر(شاهد) | ۳۲۹/۴۱ a | ۷۸/۲۷ b | ۴۲۵/۲۲ b |

***در هر ستون میانگین های دارای حروف متفاوت بر اساس آزمون Duncan در سطح ۵٪ دارای اختلاف معنی داری می‌باشند.**

**جدول ۶- میزان فسفر کل معدنی و آلی و فسفر کل در اعماق مختلف نمونه برداری**

| عمق (سانتی متر) | فسفر معدنی کل | فسفر آلی کل | فسفر کل |
|---|---|---|---|
| ۱۰-۰ | ۳۰۵/۶۴ c | ۱۰۴/۵۸ a | ۴۰۹/۵۶ c |
| ۲۰-۱۰ | ۳۳۸/۹۱ b | ۸۴/۷۳ b | ۴۲۳/۷۶ b |
| ۳۰-۲۰ | ۳۳۵/۸۷ b | ۱۰۳/۵۶ a | ۴۲۵/۴۹ b |
| ۵۰-۳۰ | ۳۶۶/۵۲ a | ۸۳/۹۳ b | ۴۶۴/۹۲ a |

*در هر ستون میانگین های دارای حروف متفاوت بر اساس آزمون Duncan در سطح ۵٪ دارای اختلاف معنی داری می‌باشند.




**شکل ۳- تغییرات عمقی فسفر کل معدنی، کل آلی و فسفر کل در دو کاربری مورد مطالعه**
**(Total inorganic- P: فسفر معدنی کل، Total organic -P: فسفر آلی کل، Total- P: فسفر کل)**

## فسفر آلی کل

مقدار کل فسفر آلی تحت تاثیر کاربری اراضی تغییر معنی‌داری داشت به طوری‌که مقدار فسفر آلی خاک از ۷۸/۲۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم در زمین بکر به ۱۱۴/۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم در کاربری پسته رسید(جدول ۵). افزایش فسفر آلی در زمین کشت پسته می‌تواند در اثر اضافه شدن بقایای گیاهی به خاک باشد(سالمون و همکاران، ۲۰۰۰). در ارتباط با تأثیر کاربری اراضی بر مقدار فسفر آلی خاک، پژوهش های مختلفی انجام شده است. شکل آبادی و همکاران(۲۰۱۴) بیان کردند که میزان کل فسفر آلی در خاکدانه‌های با اندازه کوچکتر از ۲ میلی‌متر، از کاربری بکر به اراضی کشت شده از ۳۱ به ۵۴/۳ درصد افزایش یافته است. در مطالعه دهقان و همکاران(۱۳۸۶) نیز بیان شد که مقدار فسفر کل آلی، در اراضی زیر کشت نسبت به اکوسیستم‌های طبیعی افزایش یافته است. تجری و همکاران(۱۳۹۴) بیان داشتند که میزان فسفر کل آلی از جنگل طبیعی به مرتع کاهش یافته است. یکی دیگر از دلایل کاهش فسفر آلی کل در عمق سطحی ۲۰-۱۰ سانتی متری می تواند تخریب و اکسیداسیون سریع مواد آلی باشد(لیتور و همکاران، ۲۰۰۴). مقدار فسفر آلی کل در دو عمق ۱۰-۰ و ۳۰-۲۰ سانتی متری با دو عمق ۲۰-۱۰ و ۵۰-۳۰ سانتی متری تفاوت معنی داری را نشان دادند(جدول ۶). فسفر آلی کل با عمق از روند مشخصی پیروی نکرد و در دو عمق ۱۰-۰ و ۳۰-۲۰ سانتی متری افزایش و دو عمق ۲۰-۱۰ و ۵۰-۳۰ کاهش یافت(شکل ۵). کاهش فسفر آلی در عمق ۱۰-۲۰ می‌تواند به دلیل افزایش فعالیت میکروبی و افزایش فرایند معدنی شدن فسفر آلی در این عمق باشد. در عمق ۳۰-۵۰ سانتی‌متر فسفر آلی نسبت به سایر عمق‌ها کاهش یافت که می‌توان به کمبود ماده آلی در این عمق و عدم بازگشت بقایای گیاهی به این عمق نسبت داد(مومنی و همکاران، ۱۳۸۷).

## فسفر کل خاک

بین کاربری پسته با اراضی بکر از لحاظ فسفر کل تفاوت معنی دار($P<0.05$) در سطح ۵ درصد مشاهده شد(جدول ۵). همچنین با افزایش عمق نیز تفاوت معنی داری بین دو کاربری مشاهده شد(جدول۶) و روند تغییرات آن با عمق افزایشی بود(شکل ۳). در عمق ۱۰-۰ سانتی-متری مقدار فسفر کل از ۴۰۵ میلی‌گرم در کیلوگرم به ۴۲۵/۷۴ میلی‌گرم در کیلوگرم در عمق ۵۰-۳۰ سانتی متری افزایش یافت. دلیل این افزایش احتمالا به دلیل کوددهی و عملیات کشاورزی بوده است. چروبین و همکاران(۲۰۱۶) گزارش کردند که درکشت نیشکر، افزایش مقدار فسفر کل در تمام سطوح، برابر یا بیشتر از مقادیر آن در پوشش گیاهی بومی منطقه بوده و علت آن را کانی‌های موجود در خاک و یا ورود کودهای آلی بیان کردند. دهقان و همکاران(۱۳۸۶) نیز در خاک‌های شهرکرد افزایش مقدار فسفر کل را در زمین‌های کشاورزی گزارش کردند. آنان دلیل آن را کوددهی گسترده و عملیات کشاورزی در زمین زراعی بیان کردند.

## مقایسه شکل‌های مختلف فسفر معدنی خاک در دو کاربری مورد مطالعه

## فسفر قابل استخراج با آب

بین دو کاربری پسته و زمین مجاور آن از لحاظ فسفر قابل استخراج با آب تفاوت معنی‌داری مشاهد نشد(جدول ۷)، اما با افزایش عمق مقدار فسفر قابل استخراج با آب کاهش یافت(جدول ۸). بررسی تغییرات عمقی فسفر قابل استخراج با آب نشان داد که تا عمق ۳۰ سانتی‌متری از یک روند ثابتی پیروی کرده ولی با افزایش عمق به ۵۰ سانتی‌متر، فسفر قابل استخراج با آب کاهش یافت(شکل۴ ). از آنجا که این شکل از فسفر معدنی قابلیت دسترسی بالایی برای گیاهان دارد(ردی و همکاران، ۲۰۰۵)، به نظر می‌رسد تجمع ریشه پسته در عمق ۳۰ تا ۵۰ سانتی-متری و افزایش جذب فسفر قابل استخراج با آب سبب کاهش این بخش از فسفر معدنی شده باشد. مومنی و همکاران(۱۳۸۷)، کاهش فسفر قابل استخراج با آب در اراضی کشاورزی را ناشی از برداشت محصول طی سالیان متمادی و جذب فسفر توسط گیاهان ذکر کردند که سبب تخلیه خاک از این شکل فسفر معدنی شده است. فسفر قابل

استخراج با آب به راحتی از طریق فرایندهای جذب سطحی و رسوب به شکل‌های پایدارتر فسفر تبدیل‌شود که این تبدیلات در شرایط کمبود مواد آلی شدیدتر می‌باشد(عطاردی و همکاران، ۱۳۸۴). بنابراین کاهش فسفر قابل استخراج با آب در عمق‌های پایینی را می‌توان ناشی از کمبود مواد آلی در این عمق‌ها و افزایش سرعت تبدیل فسفر قابل استخراج با آب به سایر شکل‌های پایدارتر دانست.

**جدول ۷- مقادیر گونه های فسفر در دو کاربری مورد مطالعه**

| کاربری اراضی | گونه های فسفر معدنی خاک | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $H_2O$-P | $NaHCO_3$-P | NaOH-P | HCl-P | Residual-P |
| زمین پسته | ۲/۱۵ a | ۲۲/۱۹ a | ۱۷/۳۳ b | ۱۵۵/۲۶ a | ۱۴۶/۲۳ a |
| زمین بکر(شاهد) | ۲/۲۷ a | ۱۸/۳۴ b | ۱۹/۸۵ a | ۱۶۱/۲۶ a | ۱۲۹/۸۴ b |

***در هر ستون میانگین های دارای حروف متفاوت بر اساس آزمون Duncan در سطح ۵٪ دارای اختلاف معنی داری می‌باشند.**

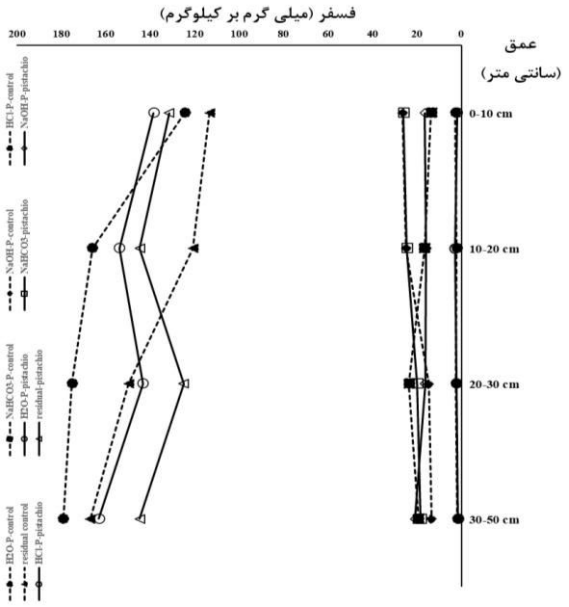
$H_2o$-P**: فسفر قابل استخراج با آب،** $NaHCO_3$-P**: فسفر قابل استخراج با بیکربنات سدیم،** NaOH-P**: فسفر قابل استخراج با سود،** HCl-P**: فسفر قابل استخراج با اسید کلریدریک،** Residual-P**: فسفر باقیمانده**

**جدول ۸- مقادیر گونه های فسفر در عمق های مختلف نمونه برداری**

| عمق | گونه های فسفر معدنی خاک | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $H_2O$-P | $NaHCO_3$-P | NaOH-P | HCl-P | Residual-P |
| ۱۰-۰ | ۲/۴۱ b | ۱۹/۲۰ a | ۲۲/۰۰ a | ۱۴۰/۶۵ c | ۱۱۷/۰۴ b |
| ۲۰-۱۰ | ۲/۴۱ b | ۲۰/۱۳ a | ۲۰/۷۸ a | ۱۶۰/۶۵ b | ۱۵۴/۰۹ a |
| ۳۰-۲۰ | ۲/۳۵ b | ۲۱/۹۱ a | ۱۵/۳۴ b | ۱۶۱/۰۸ b | ۱۴۷/۲۳ a |
| ۵۰-۳۰ | ۱/۷۰ a | ۱۸/۹۶ a | ۱۶/۷۹ b | ۱۷۲/۰۰ a | ۱۳۰/۱۴ b |

***در هر ستون میانگین های دارای حروف متفاوت بر اساس آزمون Duncan در سطح ۵٪ دارای اختلاف معنی داری می‌باشند.**

$H_2o$-P**: فسفر قابل استخراج با آب،** $NaHCO_3$-P**: فسفر قابل استخراج با بیکربنات سدیم،** NaOH-P**: فسفر قابل استخراج با سود،** HCl-P**: فسفر قابل استخراج با اسید کلریدریک،** Residual-P**: فسفر باقیمانده**




**شکل ۴- تغییرات عمقی شکل های مختلف فسفر معدنی**

## فسفر قابل استخراج با بیکربنات سدیم

مقایسه میانگین در سطح پنج درصد، مقدار فسفر قابل استخراج با بیکربنات سدیم را با تفاوت معنی‌دار نشان داد(جدول ۷). مقدار این بخش از فسفر معدنی در زمین تحت کشت پسته(۲۲/۱۹ میلی گرم در کیلوگرم) بیشتر از زمین بکر(۱۸/۳۴میلی گرم بر کیلوگرم) مشاهده شد. نتایج نشان داد که فسفر قابل استخراج با بیکربنات سدیم در کاربری پسته ۱۷ درصد بیشتر از کاربری بکر می-باشد(جدول ۷). در بررسی چهار ردیف از اراضی اصفهان و شهرکرد که توسط دهقان و همکاران(۱۳۸۶) انجام شد، مقدار این شکل از فسفر در اراضی زراعی از خاک بکر بیش‌تر اندازه‌گیری شد. این بخش از فسفر معدنی با افزایش عمق روند نامنظمی داشت و با افزایش عمق مقدار فسفر قابل استخراج با بیکربنات سدیم به طور نامنظم کاهش یافت(شکل ۴). بیشتر بودن مقدار فسفر قابل استخراج با بیکربنات سدیم در افق‌های سطحی را می‌توان ناشی از مصرف کود شیمیایی دانست. کاهش مقدار فسفر قابل استخراج با بیکربنات سدیم در عمق ۵۰-۳۰ سانتی متری را می توان به جذب سطحی توسط کربنات ها و رسوب فسفر در شکل های پایدار دانست.

## فسفر قابل استخراج با سود

بین دو کاربری پسته و زمین بکر از لحاظ فسفر قابل استخراج با سود تفاوت معنی‌دار($P<0.05$) مشاهده گردید. مقدار فسفر قابل استخراج با سود در زمین بکر ۱۳درصد بیشتر از کاربری پسته بود(جدول ۶). فسفر قابل استخراج با سود بیانگر بخشی از فسفر معدنی است که به آهن متصل شده است(حجازی مهریزی و همکاران، ۱۳۹۴). کاهش جزیی فسفر قابل استخراج با سود در کاربری پسته را شاید بتوان ناشی از جذب آهن توسط گیاه و ناپایدار شدن فسفات‌های آهن در خاک دانست. همچنین تبدیل فسفر قابل استخراج با سود به کانی‌های پایدارتر به ویژه فسفات‌های کلسیم را می‌توان به عنوان دلیلی دیگر در کاهش فسفر قابل استخراج با سود دانست. بر اساس نتایج به دست آمده، میزان کربنات کلسیم در کاربری پسته از زمین بکر بیشتر بود که می‌تواند شرایط را برای تبدیل بیشتر فسفر قابل استخراج با سود به فسفات‌های کلسیم را تسهیل نماید. در مطالعه‌ای که توسط سولمون و همکاران(۲۰۰۲) در تانزانیا با هدف بررسی شکل‌های مختلف فسفر در نتیجه کشت و کار انجام شد، نتایج نشان داد که با تداوم کشت و کار فسفر قابل استخراج با سود در خاک کاهش یافت. دو عمق ۱۰-۰ و ۲۰-۱۰ سانتی متری تفاوت معنی داری با دو عمق ۳۰-۰ و ۵۰-۳۰ سانتی متری از لحاظ فسفر قابل استخراج با سود نشان دادند(جدول ۸). بررسی روند این بخش از فسفر معدنی با عمق نیز نشان داد که با افزایش عمق مقدار فسفر قابل استخراج با سود کاهش یافت و کمترین مقادیر در عمق ۳۰-۲۰ سانتی متری و ۳۰ تا ۵۰ سانتی‌متری خاک مشاهده شد. این بخش از فسفر معدنی، میزان فسفری است که بوسیله اکسیدهای آهن و آلومینیوم جذب شده و در مقایسه با دو جزء قبلی به سرعت کمتری در اختیار گیاه قرار می‌گیرد(حجازی مهریزی و همکاران، ۱۳۹۵). در مطالعات هارل و وانگ(۲۰۰۶) آمده است که این بخش از فسفر معدنی توسط اکسیدها و هیدروکسید-های آهن و آلومینیوم، مواد آلی و همچنین کانی‌های سیلیکاتی موجود در خاک تثبیت و با افزایش عمق مقدار آن کاهش می‌یابد. در مطالعات ورما و همکاران(۲۰۰۵) آمده است که این بخش از فسفر معدنی به عنوان فسفر قابل دسترس شناخته می‌شود و لذا افزایش مقدار آن در خاک می‌تواند در طولانی‌مدت به تغذیه فسفر گیاه کمک کند.

## فسفرقابل استخراج با اسید کلریدریک

فسفر قابل استخراج با اسید کلریدریک در دو کاربری پسته و زمین بکر مجاور آن تفاوت معنی‌داری نداشت(جدول ۷). این امر می‌تواند ناشی از پایداری بالای فسفات‌های کلسیم در خاک‌های آهکی باشد که سبب شده تا این شکل از فسفر معدنی به راحتی تحت تأثیر کاربری اراضی قرار نگیرد. این نتایج با یافته های شارپلی و همکاران(۱۹۸۵) همخوانی ندارد. آن‌ها بیان داشتند که

کشت و کار مقدار فسفر پیوند یافته با کلسیم(فسفر قابل استخراج با اسید) را افزایش می‌دهد. بررسی تغییرات عمقی فسفر قابل استخراج با اسید کلریدریک روند افزایشی را نشان داد بطوریکه مقدار آن از ۱۴۰/۶۵ میلی گرم بر کیلوگرم در عمق ۱۰-۰ سانتی متری به ۱۷۲ میلی گرم بر کیلوگرم در عمق ۵۰-۳۰ سانتی متری رسید(شکل ۴). کمتر بودن میزان فسفر قابل استخراج با اسید کلریدریک در بخش سطحی خاک را شاید بتوان به حضور بیشتر ماده آلی در این عمق نسبت داد که از تشکیل شکل‌های پایدار فسفر نظیر آپاتیت ممانعت می‌کند. لارسن و همکاران(۱۹۷۰) در مطالعات خود بیان داشتند که حضور ماده آلی تشکیل آپاتیت را به میزان ۱۰ درصد کاهش داده و امکان جداسازی فسفر از بلورهای تازه تشکیل شده آپاتیت را فراهم می سازد. این بخش از فسفر معدنی شامل بخشی از فسفر است که توسط کربنات کلسیم جذب شده و به صورت آپاتیت رسوب می‌کند لذا قابلیت جذب پایینی برای گیاه دارد(وانگ و همکاران، ۲۰۱۰). فسفر قابل استخراج با اسید کلریدریک در هر دو کاربری ۴۰-۵۰ درصد از فسفر معدنی را به خود اختصاص داده است. این بخش از فسفر معدنی، به عنوان بخش غالب فسفات‌های کلسیمی در تعدادی از خاک‌های آهکی ایران نیز گزارش شده است(ادهمی و همکاران، ۲۰۰۶). در خاک‌هایی که pH های پایین دارند حلالیت فسفر بیشتر بوده و در خاک‌های با pH بالا، بخش-های کمی از فسفر در شکل‌های به راحتی قابل استخراج آلی و معدنی وجود دارد، در نتیجه در این خاک‌ها فسفر قابل حل در اسید نسبتا غالب است(تایسن و همکاران، ۱۹۸۳).

## فسفر باقیمانده

فسفر باقی‌مانده خاک در کاربری پسته (۱۴۶/۲۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم) به طور معنی‌داری بیشتر از زمین بکر (۱۲۹/۸۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود(جدول۶). این روند افزایشی در سطح زمین کشت پسته می‌تواند به دلیل کود-دهی منطقه باشد. کاربرد مداوم کودهای فسفری بیش از نیاز گیاه در خاک منجر به تجمع بیش‌تر فسفر باقیمانده در خاک می‌شود(گاتیبونی و همکاران،۲۰۲۰). از آنجایی که هر ساله مقادیر زیادی کود فسفره وارد خاک می‌شود و بخش اعظمی از این کودها به عنوان فسفر باقیمانده در خاک باقی می‌ماند، بنابراین اطلاع از میزان فسفر باقیمانده خاک می-تواند در مدیریت مصرف بهینه کود و در نتیجه آن کاهش آلودگی محیط زیست موثر و ضروری باشد. تغییرات عمقی فسفر باقیمانده روند منظمی را نشان نداد به طوری‌که با افزایش عمق تا ۳۰ سانتی‌متر فسفر باقی‌مانده افزایش و سپس در عمق ۳۰ تا ۵۰ سانتیمتر کاهش یافت(شکل۳). سلطان قیسی و همکاران (۲۰۱۹) بیان کردند که میزان فسفر باقیمانده در دو کاربری جنگل و مرتع در دو خاک با بافت متفاوت در عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری، تفاوت معنی‌داری نداشتند. چن و همکاران(۲۰۰۰) بیان داشتند که مقدار فسفر باقیمانده در خاک‌های جنگلی نسبت به علفزار مجاور کمتر است. همچنین گارسیا و همکاران(۲۰۰۰) مقدار فسفر باقیمانده را در اراضی مراتع ۲۰ ساله نسبت به اراضی جنگلی کمتر گزارش کردند.

## فسفر قابل جذب خاک

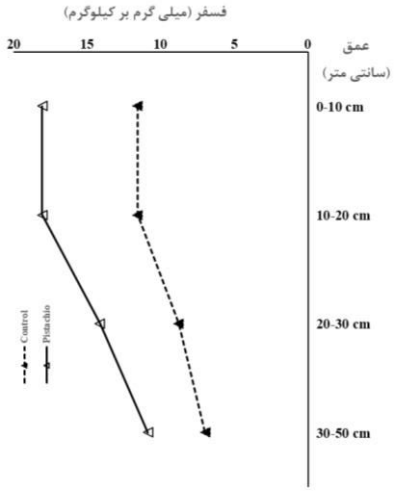
مقدار فسفر قابل جذب خاک بین دو کاربری متفاوت بود به طوری‌که مقدار آن از ۸/۷۹ میلی گرم بر کیلوگرم در زمین بکر به ۱۴/۱۴ میلی گرم بر کیلوگرم در کاربری پسته رسید(جدول۹). دلیل این امر در زمین تحت کشت پسته می‌تواند استفاده از کود فسفری در طول دوره کشت باشد. نتایج این پژوهش با یافته‌های رضایی‌نژاد و همکاران(۱۳۹۰) مطابقت دارد، که بیان کردند مقدار فسفر قابل جذب در خاک‌های تحت کشت پسته بیشتر از زمین-های مرتعی است. همچنین ابراهیمی و همکاران(۱۳۹۵) بیان داشتند که میزان فسفر قابل جذب در خاک‌های زراعی از خاک‌های مرتعی بیش‌تر است. مقدار فسفر قابل جذب خاک بین عمق‌های نمونه‌برداری متفاوت بود و با افزایش عمق مقدار آن به طور نامنظم نسبت به سطح افزایش یافت(شکل ۵). کمترین مقدار فسفر قابل دسترس در لایه

۲۰-۱۰ سانتی متری(۸/۴۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم) مشاهده شد که شاید بتوان ناشی از تمرکز ریشه در این عمق و جذب این بخش از فسفر توسط ریشه دانست.

**جدول ۹- میزان فسفر قابل جذب در دو کاربری مورد مطالعه (الف) و اعماق مختلف نمونه برداری (ب)**

| (الف) | | (ب) | |
|---|---|---|---|
| کاربری اراضی | فسفر قابل جذب (میلی گرم در کیلوگرم) | عمق (سانتی متر) | فسفر قابل جذب (میلی گرم در کیلوگرم) |
| زمین پسته | ۱۴/۱۴ [a] | ۱۰-۰ | ۱۱/۶ [c] |
| | | ۲۰-۱۰ | ۸/۴۳ [d] |
| زمین بکر (شاهد) | ۸/۷۹ [b] | ۳۰-۲۰ | ۱۵/۵۵ [a] |
| | | ۵۰-۳۰ | ۱۳/۱۷ [b] |

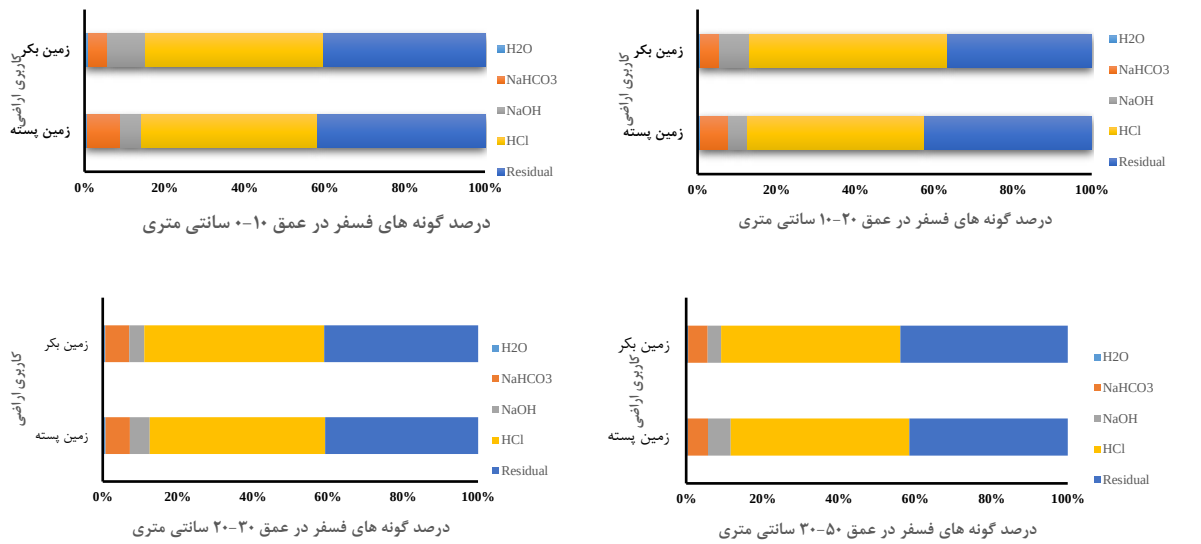
***در هر ستون میانگین های دارای حروف متفاوت بر اساس آزمون Duncan در سطح ۵٪ دارای اختلاف معنی داری می‌باشند.**




**شکل ۵- تغییرات عمقی فسفر قابل جذب خاک**

## توزیع اجزای فسفر

توزیع شکل‌های فسفر معدنی در دو کاربری پسته و بکر به تفکیک عمق در شکل(۶) نشان داده شده است. به دلیل ماهیت آهکی خاک‌های مورد مطالعه، فسفر قابل استخراج با اسید کلریدریک، که بیانگر فسفات‌های کلسیم می‌باشند، بیشترین سهم از فسفر معدنی را به خود اختصاص داده، بعد از آن فسفر باقیمانده در تمامی اعماق و در دو کاربری بیش ترین سهم را داشته است، در مقابل کمترین سهم از فسفر معدنی در دو کاربری پسته و بکر و در تمامی اعماق به فسفر قابل استخرج با آب اختصاص یافت. سهم سایر شکل‌های فسفر معدنی در دو کاربری و در اعماق مختلف متفاوت بود. در اعماق ۱۰-۰، ۲۰-۱۰ و ۳۰-۲۰ سانتی متری زمین کشت پسته سهم گونه های فسفر قابل استخراج با بیکربنات سدیم بیشتر از فسفر قابل استخراج با سود بود اما این روند برای عمق ۵۰-۳۰ سانتی متری برعکس بود و در این عمق مقدار فسفر قابل استخراج با سود بیشتر از فسفر قابل استخراج با بیکربنات سدیم مشاهده شد(شکل ۶). در زمین بکر در دو عمق ۱۰-۰ و ۲۰-۱۰ سانتی متری مقدار فسفر قابل استخراج سود بیش تر از فسفر قابل استخراج با بیکربنات سدیم بود در حالیکه در دو عمق ۳۰-۲۰ و ۵۰-۳۰ سانتی متری این روند بر عکس بود(فسفر قابل استخراج با اسید کلریدریک> فسفر باقیمانده> فسفر قابل استخراج با بیکربنات سدیم> فسفر قابل استخراج با سود> فسفر قابل استخراج با آب.).




**شکل ۶- درصد گونه های فسفر در اعماق مختلف در اراضی کشت پسته و بکر**

## ذخایر فسفر[۷]

اطلاع از وضعیت ذخیره اشکال مختلف فسفر در شرایط مختلف شیمیایی و در کاربری های مختلف، کمک شایانی در رابطه با در دسترس بودن این عنصر، به منظور ایجاد وضعیت حاصل خیزی مطلوب فراهم می کند. میزان شکل های ذخیره شده فسفر(کیلوگرم در هکتار) به تفکیک عمق در دو زمین پسته و بکر در شکل(۷) نشان داده شده است. به طور کلی فسفر قابل استخراج با اسید کلریدریک بیشترین جزء ذخیره فسفر(تقریبا ۴۴ درصد) را در هر دو کاربری به خود اختصاص داده است و بعد از آن فسفر باقیمانده بیشترین سهم را دارا می‌باشد که به دلیل pH خاک‌های مورد مطالعه و حضور مقادیر قابل توجه کربنات کلسیم در خاک چنین نتایجی قابل انتظار بود. فسفر قابل استخراج با آب، قابل استخراج با بیکربنات سدیم و قابل استخراج با سود در مرتبه های بعدی قرار می‌گیرند که سهم تقریبا یکسانی دارند. در عمق سطحی خاک (۱۰-۰ سانتی-متری) برای زمین بکر بیشترین سهم مربوط به فسفر قابل استخراج با آب و سود بوده و فسفر باقیمانده در مرتبه بعدی قرار می‌گیرد. در زمین پسته در این عمق فسفر قابل استخراج با بیکربنات سدیم بیش‌ترین و فسفر باقیمانده کمترین سهم را به خود اختصاص داده است. در عمق‌های سطحی خاک به دلیل وجود ریشه گیاهان، و بالاتر بودن مقدار ماده آلی، مقادیر بیشتری از فسفر به شکل‌های قابل دسترس‌تر حضور دارند. با افزایش عمق در هر دو کاربری، میزان ذخیره اشکال فسفر بیشتر از نوع پایدار مانند فسفر قابل استخراج با اسید کلریدریک و فسفر باقیمانده بوده که میزان آن ها به طور نامنظم افزایش یافت(شکل ۷).

---

[۷] P stocks.

**شکل ۷- ذخایر فسفر در دو کاربری مورد مطالعه و در اعماق مختلف نمونه برداری**

## همبستگی بین شکل‌های فسفر و خصوصیات خاک

جداول ۱۰ و ۱۱ همبستگی بین شکل‌های فسفر و خصوصیات خاک در دو کاربری را نشان می‌دهد. همانطور که در جدول مشاهده می کنید بغیر از هدایت الکتریکی و ماده آلی، بین سایر خصوصیات خاک و گونه های فسفر همبستگی قوی مشاهده نشد. در هر دو کاربری بین هدایت الکتریکی و برخی از گونه های فسفر همبستگی قوی مشاهده شد. در زمین بکر نیز درصد ماده آلی با برخی از گونه های فسفر از جمله فسفر باقیمانده(۰/۶۸-) و فسفر کل(۰/۷۳-) همبستگی قوی منفی و با فسفر قابل دسترس(۰/۵۸+) همبستگی مثبت نشان داد. این امر نشان می دهد که این خصوصیات را می توان به شدت با همدیگر مرتبط دانست. یکی از منابع مهم فسفر خاک، ماده آلی می باشد(ملکوتی و همکاران،۱۳۸۲). به طور کلی دلیل افزایش جذب فسفر در اثر ماده آلی مربوط به تولید دی اکسید کربن حاصل از تجزیه ماده آلی، کاهش تماس فسفر با سطوح ذرات اکسیدهای آهن و آلومینیوم، تشکیل ترکیبات آلی فسفر، رس و کربنات کلسیم، و در نتیجه کاهش تثبیت آن می باشد(ملکوتی و همکاران، ۱۳۸۳). pH با هیچ یک از اشکال فسفر در هر دو کاربری همبستگی نداشت. دلیل این امر می تواند احتمالا به دلیل نزدیک بودن مقایر pH خاک ها به همدیگر و قرار داشتن آن ها در محدوده خنثی تا کمی قلیایی باشد. در زمین کشت پسته یک همبستگی منفی بین درصد کربنات کلسیم معادل و فسفر باقیمانده(۰/۴۲-) مشاهده شد که همبستگی مشابهی برای خاک های باتلاقی آهکی در اسپانیا مشاهده شد(جیمنز و همکاران، ۲۰۰۸). در هر دو کاربری کشت پسته و بکر فسفر قابل استخراج با اسید کلریدریک با فسفر کل معدنی همبستگی مثبت قوی(به ترتیب ۰/۷۶+ و ۰/۷۳+) و با فسفر کل آلی همبستگی منفی قوی(به ترتیب ۰/۷۸- و ۰/۷۰-) نشان داد. این جزء از فسفر ۵۰ درصد فسفر معدنی کل را تشکیل می دهد که رابطه مثبت و قوی این مطلب را تایید می کند. فسفر قابل دسترس در دو کاربری کشت پسته و زمین بکر با فسفر کل(به ترتیب ۰/۸۷- و ۰/۸۳-) و در زمین بکر با فسفر باقیمانده(۰/۸۴-) همبستگی منفی و قوی نشان داد.

**جدول ۱۰- ارتباط بین گونه‌های فسفر و برخی از ویژگی‌های خاک در زمین کشت پسته**

| | $H_2O$-P | $NaHCO_3$-P | NaOH-P | HCl-P | Residual-P | Inorganic-P | Organic-P | Total-P | Available-P |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| pH | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| EC | ۰/۳۳* | ns | −۰/۶۴** | ns | ns | ns | ns | −۰/۷۳** | ۰/۶۴** |
| BD | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| $CaCO_3$ | ns | −۰/۳۲* | ns | ns | −۰/۴۲** | ns | ns | ns | ns |
| OM | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| $H_2O$-P | ۱ | ۰/۳۸** | ns | ns | ns | ns | ns | −۰/۴۲** | ۰/۴۴** |
| $NaHCO_3$-P | ۰/۳۸** | ۱ | ns | ۰/۳۵* | ns | ns | ns | −۰/۴۸** | ۰/۵۷** |
| NaOH-P | ns | ns | ۱ | −۰/۳۶* | ns | −۰/۳۹** | ۰/۵۸** | ۰/۴۳** | −۰/۵۰** |
| HCl-P | ns | ۰/۳۵* | −۰/۳۶* | ۱ | ns | ۰/۷۶** | −۰/۷۸** | ns | ns |
| Residual-P | ns | ns | ns | ns | ۱ | ns | ۰/۳۱* | ns | ns |
| Inorganic-P | ns | ns | −۰/۳۹** | ۰/۷۶** | ns | ۱ | −۰/۹۰** | ۰/۳۰* | ns |
| Organic-P | ns | ns | ۰/۵۸** | −۰/۷۸** | ۰/۳۱* | −/۹۰** | ۱ | ns | ns |
| Total-P | −۰/۴۲** | −۰/۴۸** | ۰/۴۳** | ns | ns | ۰/۳۰* | ns | ۱ | −۰/۸۷** |
| Available-P | ۰/۴۴** | ۰/۵۷** | −۰/۵۰** | ns | ns | ns | ns | −۰/۸۷** | ۱ |

* و ** به ترتیب معنی داری در سطح یک و پنج درصد، ns: عدم معنی داری

$H_2O$-P: فسفر قابل استخراج با آب، $NaHCO_3$-P: فسفر قابل استخراج با بیکربنات سدیم، NaOH-P: فسفر قابل استخراج با سود، Residual-P: فسفر باقیمانده، Available-P: فسفر قابل دسترس، Total inorganic-P: فسفر معدنی کل، Total organic-P: فسفر آلی کل و Total-P: فسفر کل.

**جدول ۱۱- همبستگی بین گونه‌های فسفر و برخی از ویژگی‌های خاک در زمین بکر**

| | $H_2O$-P | $NaHCO_3$-P | NaOH-P | HCl-P | Residual-P | Inorganic-P | Organic-P | Total-P | Available-P |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| pH | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| EC | ns | ns | ۰/۳۵** | ns | −۰/۸۶** | −۰/۳۲* | ns | −۰/۸۳** | /۸۹** |
| BD | ns | ۰/۲۶* | −۰/۲۵* | ۰/۳۱* | ۰/۳۴** | ns | ns | ۰/۵۵** | −۰/۵۰** |
| $CaCO_3$ | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | −۰/۳۸** | ۰/۳۸** |
| OM | ns | ns | ns | −۰/۴۵** | −۰/۶۸** | −۰/۶۶** | ۰/۵۶** | −۰/۷۳** | ۰/۵۸** |
| $H_2O$-P | ۱ | ns | ns | −۰/۴۰** | ns | ns | ۰/۲۹* | ns | ns |
| $NaHCO_3$-P | ns | ۱ | −۰/۷۴** | ۰/۳۲* | ۰/۳۹** | ns | ns | ۰/۴۶** | −۰/۳۰* |
| NaOH-P | ns | −۰/۷۴** | ۱ | −۰/۳۹** | −۰/۵۲** | ns | ns | −۰/۵۵** | ۰/۴۱** |
| HCl-P | −۰/۴۰** | ۰/۳۲* | −۰/۳۹** | ۱ | ۰/۳۹** | ۰/۷۳** | −۰/۷۰** | ۰/۴۷** | ns |
| Residual-P | ns | ۰/۳۹** | −۰/۵۲** | ۰/۳۹** | ۱ | ۰/۳۴** | ns | ۰/۸۲** | −۰/۸۴** |
| Inorganic-P | ns | ns | ns | ۰/۷۳** | ۰/۳۴** | ۱ | −۰/۹۷** | ۰/۵۴** | ns |
| Organic-P | ۰/۲۹* | ns | ns | −۰/۷۰** | ns | −۰/۹۷** | ۱ | −۰/۳۸** | ns |
| Total-P | ns | ۰/۴۶** | −۰/۵۵** | ۰/۴۷** | ۰/۸۲** | ۰/۵۴** | −۰/۳۸** | ۱ | −۰/۸۳** |
| Available-P | ns | −۰/۳۰* | ۰/۴۱** | ns | −۰/۸۴** | ns | ns | −۰/۸۳** | ۱ |

* و ** به ترتیب معنی داری در سطح یک و پنج درصد، ns: عدم معنی داری

$H_2O$-P: فسفر قابل استخراج با آب، $NaHCO_3$-P: فسفر قابل استخراج با بیکربنات سدیم، NaOH-P: فسفر قابل استخراج با سود، Residual-P: فسفر باقیمانده، Available-P: فسفر قابل دسترس، Total inorganic-P: فسفر معدنی کل، Total organic-P: فسفر آلی کل و Total-P: فسفر کل.

## نتیجه‌گیری

به طور کلی نتایج این تحقیق نشان داد، در خاک های آهکی مطالعه شده در دو کاربری، فراوانی اشکال مختلف فسفر معدنی به ترتیب فسفر قابل استخراج با اسید کلریدریک> فسفر باقیمانده> فسفر قابل استخراج با بیکربنات سدیم> فسفر قابل استخراج با سود> فسفر قابل استخراج با آب بوده است. این نتایج نشان می دهد به دلیل شرایط شیمیایی خاک های مورد مطالعه، قسمت اعظم فسفر قابل استفاده در اراضی پسته کاری به حالت رسوب و پایدار (فسفر در پیوند با کلسیم و فسفر باقیمانده) درآمده که برای گیاه قابل استفاده نیستند. به نظر می‌رسد روش هایی مانند استفاده از مواد آلی می تواند بخشی از فسفر را از حالت پایدار و رسوب در خاک به فرم قابل دسترس برای گیاه تبدیل کند. از طرفی افزایش میزان فسفر باقیمانده در اراضی کشت پسته نشان از مصرف زیاد کودهای فسفره و غیر قابل جذب شدن آن ها برای گیاه و رسوب در شکل نامحلول دارد، لذا کاربرد غلظت های کمتر کود شیمیایی و به صورت چند باره و استفاده ترکیبی از کودهای شیمیایی و آلی با هدف افزایش راندمان کودهای مصرفی توصیه می‌شود.

## فهرست منابع


۱. ابراهیمی، م، روحی مقدم، ع و کاشانی، س. ۱۳۹۵. تاثیر تغییر کاربری مرتع به کشاورزی بر حاصلخیزی خاک در منطقه تفتان. نشریه دانش آب و خاک. شماره ۱، صفحه ۳۱-۴۴.

۲. تجری، س، بارانی مطلق، م، خرمالی، ف و کیانی، ف. ۱۳۹۴. اثر تغییر کاربری اراضی بر شکل های فسفر معدنی در خاک های لسی منطقه توشن استان گلستان. نشریه آب و خاک(علوم و صنایع کشاورزی). جلد ۲۹، شماره ۲، صفحه ۴۵۳-۴۶۵.

۳. تقی‌پور، آ، رضاپور،س، دولتی، ب و حمزه‌نژاد تقلید آباد، ر. ۱۳۹۴. بررسی تاثیر کاربری اراضی بر برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک در خوی، استان آذربایجان غربی. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). جلد ۲۹، شماره ۲، صفحه ۴۱۸-۴۳۱.

۴. جعفری، س. ۱۳۸۴ . مطالعه تحول ساختمانی، مینرالوژیکی، فیزیکوشیمیایی و تثبیت پتاسیم در خاک‌ها و کانی‌های رسی اراضی تحت کشت تناوبی، نیشکری و بکر خوزستان. پایان نامه دکترا بخش خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.

۵. جعفری، س، گلچین، ا و طولابی‌فرد، ا. ۱۳۹۵. تاثیر تغییر کاربری اراضی بر خصوصیات اجزاء فیزیکی ماده آلی، میزان رس قابل انتشار و پایداری خاکدانه‌ها در برخی از اراضی استان خوزستان. تحقیقات آب و خاک ایران. جلد ۴۷، شماره ۳، صفحه ۵۳۹-۶۰۳.

۶. حاج عباسی، م، ع، بسالت پور، ا و مللی، ا. ۱۳۸۶. اثر تبدیل مراتع به اراضی کشاورزی بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک های جنوب و جنوب غربی اصفهان. نشریه علوم آب و خاک.۱۱ جلد ۱۱، شماره ۴۲، صفحه ۵۲۵-۵۳۴.

۷. حجازی مهریزی، م، آیینه حیدری، م و عباس‌زاده، ف. ۱۳۹۵، بررسی پویایی فسفر در یک خاک آهکی تیمار شده با سطوح مختلف کود مرغی و کود شیمیایی،https://civilica.com/doc/1587582

۸. حجازی مهریزی، م، آیینه حیدری، م و عباس‌زاده، ف. ۱۳۹۴. توزیع اجزای فسفر معدنی در خاک آهکی تیمار شده با کود مرغی و فسفر در زمان‌های مختلف خواباندن. پژوهش های خاک، جلد ۲۹، شماره ۳، صفحه ۲۹۷-۳۰۸.

۹. دهقان، ر، شریعتمداری، ح و خادمی، ح. ۱۳۸۶. شکل‌های فسفر خاک در چهار ردیف اراضی از مناطق اصفهان و شهرکرد. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. جلد ۱۱، شماره ۴۲، صفحه ۴۶۳-۴۷۲.

۱۰. رضایی‌نژاد، ر، ابطحی، ع، زین‌الدینی، ع، زارع، س و شاهنظری‌کرباسرایی، س. ۱۳۹۰. تاثیر تغییر کاربری اراضی بر برخی خصوصیات شیمیایی خاک. دوازدهمین کنگره علوم خاک ایران، تبریز. ۳ص.

۱۱. صادقی میانرودی، م، معزی، ع، غلامی، ع، بابائی نژاد، ت و پناهپور، ا. ۱۴۰۰. تاثیر تغییر کاربری اراضی بر ویژگی‌های فیزیکی و عناصر غذایی خاک در منطقه شمال خوزستان. مهندسی زراعی (مجله علمی کشاورزی). جلد ۴۴، شماره ۴، صفحه ۳۸۳-۳۹۷.

۱۲. کرمی، ز و شریفی، ز. ۱۳۹۹. ارزیابی اثر تغییر کاربری اراضی از مرتع به گندم دیم بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک با استفاده از شاخص کیفیت خاک. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۸ شماره ۲، صفحه ۲۰۱-۲۱۳.

۱۳. لندی، ا، پورکیهان، س، چرم، م، حجتی، س و جعفری، س. ۱۳۹۷. مطالعه اثرات تغییر کاربری اراضی و احداث مزارع نیشکر برخصوصیات فیزیکوشیمیایی، کانی‌شناسی و میکرومورفولوژیکی خاک در منطقه جنوب خوزستان. مجله مدیریت خاک و تولید پایدار. جلد ۸، شماره ۲، صفحه ۴۳-۶۱.

۱۴. مظفری، ح و موسوی، ع، ا.۱۳۹۷. اثر تغییر کاربری اراضی بر تغییرات واکنش و میزان آهک در خاک های باجگاه استان فارس. نهمین همایش سراسری کشاورزی و منابع طبیعی پایدار. تهران. https://civilica.com/doc/918868

۱۵. ملکوتی، م، ج. همایی، م. ۱۳۸۳. حاصلخیزی خاک های مناطق خشک و نیمه خشک " مشکلات و راه حل ها". ناشر دانشگاه تربیت مدرس، دفتر نشر آثار علمی. چاپ دوم. ۵۱۸ صفحه.

۱۶. ملکوتی، م، ج. ۱۳۸۲. تغذیه گیاهان در شرایط شور. انتشارات سنا .تهران. ۲۴۶ صفحه.

۱۷. مومنی، م، کلباسی، م، جلالیان، ا و خادمی، ح. ۱۳۸۷. اثر تغییر کاربری و چرای مفرط بر هدررفت برخی از شکل‌های فسفر خاک در دو منطقه از زیر حوطه آبخیز ونک. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. جلد ۱۲، شماره ۴۶، صفحه ۵۹۵-۶۰۶.

۱۸. نورمندی‌پور، ف، فرپور، م، ه، سرچشمه‌پور، م. ۱۳۹۲. مقایسه خصوصیات فیزیکی شیمیایی و میکرومورفولوژی خاک‌های تحت کشت پسته و کشت نشده مجاور آن در منطقه بیاض. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). جلد ۲۷، شماره ۱، صفحه ۱۶۹-۱۷۹.

۱۹. وفایی‌زاده، ر، ایوبی، ش، ا، مصدقی، م،ر و یوسفی فرد، م. ۱۳۹۵. تأثیر موقعیت شیب و تغییر کاربری اراضی بر ویژگی های خاک و پذیرفتاری مغناطیسی در اراضی تپه ماهوری یاسوج. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). جلد ۳۰، شماره ۲، صفحه ۶۳۲-۶۴۲.

20. Abd El-Galil, A., and Adly, A.M.O. 2005. Spatial variability of phosphorus fractions in surfacial sediments along the river Nile, Egypt. Environmental inmact assessment. Ass. Univ. Bull. Environ. Res. 8: 2. 41-57.
21. Adhami, E., M. Maftoun, A. Ronaghi, N. Karimian, J. Yasrebi, and M. T. Assad. 2006. Inorganic phosphorus fractionation of highly calcareous soils. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 37:1877-1888.
22. Bouyoucos, G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. Agron. J. 54: 464-465.
23. Brady N.C., and Weil R.R. 2008. Nature and Properties of Soils, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall USA, 13: 662-710.
24. Celik, I. 2005. Land -use effects on organic matter and physical properties of soil in a southern Mediterranean highland of Turkey. Soil Tillage Res. 83: 270-277.
25. Chen, C.R., Condron, L.M., Davis, M.R., and Sherlock, R.R., 2000. Effects of afforestation on phosphorus dynamics and biological properties in a New Zealand grassland soil. Plant Soil. 220 (1-2):151–163.
26. Cherubin, M. R., Franco, A. L., Cerri, C. E., Karlen, D. L., Pavinato, P. S., Rodrigues, M., and Cerri, C. C. 2016. Phosphorus pools responses to land-use change for sugarcane expansion in weathered Brazilian soils. Geoderma. 265: 27-38.
27. Chibsa, T. and A. Ta'a. 2009. Assessment of soil organic matter under four land use systems, in Bale Highlands, Southeast Ethiopia A. (Soil Organic Matter Contents in Four Land Use Systems: Forestland, Grassland, Fallow Land and Cultivated Land). World Appl. Sci. J. 6(9): 1231-1246.
28. Garcia-Montiel, D.C., Neill, C., Melillo, J., Thomas, S., Steudler, P.A., and Cerri, C.C., 2000. Soil phosphorus transformations following forest clearing for pasture in the Brazilian Amazon. Soil Sci. Soc. Am. J. 64:1792–1804.
29. Grossman, R.B., and T.G. Reinsch. 2002. Bulk density and linear extensibility. p. 202-228. In J.H. Dane and G.C. Topp (eds.) Methods of Soil Analysis, Part 4. Physical Methods. Soil Sci. Soc. Am. J. Book Series No. 5. ASA and SSSA, Madison, WI.
30. Harrell, D. L., and Wang, J. J. 2006. Fractionation and sorption of inorganic phosphorus in Louisiana calcareous soils. Soil Sci, 171(1):39-51.
31. Hedley, M. J., Stewart, J. W. B. and Chauhan, B. S., 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation and by laboratory incubations", Soil Sci. Soc. Am. J. 46: 970-976.
32. Jiang Y., Zhang Y.G., Zhou D., Qin Y., and Liang W.J. 2009. Profile distribution of micronutrients in an aquic brown soil as affected by land use. Plant, Soil and Environ. 55(11): 468-476.
33. Jimenez-Carceles, F. J., and Alvarez-Rogel, J. 2008. Phosphorus fractionation and distribution in salt marsh soils affected by mine wastes and eutrophicated water: a case study in SE Spain. Geoderma. 144: 299–309
34. Larsen, S. and A. E. Widdowon. 1970. Evidence of dicalcium phosphate precipitation in a calcareous soil. J. Soil Sci. 21(2): 364 – 367

35. Litaor M.L., Reichmann O., Auerswald K., Haim A., and Shenker M. 2004. The geochemistry of phosphorus in peat soils of a semiarid altered wetland. Soil Sci. Soc. Am. J. 68: 2078-2085.
36. Lizaga I., Quijano L., Gaspar L., Ramos M.C. and Navas A. 2019. Linking land use changes to variation in soil properties in a Mediterranean mountain agroecosystem. Catena. 172: 516-527.
37. Maranguit, D., Guillaume, T., and Kuzyakov, Y. 2017. Land-use change affects phosphorus fractions in highly weathered tropical soils. Catena. 149: 385-393.
38. Meixner, R. E. and M. J. Singer. 1985. Phosphorus fractions from a chornosequence of alluvial soils, Sanjonquin Valley, California. Soil Sci. 139: 37-46.
39. Murphy, J., and J.P. Riley.1962. A modified single solution method for determination of phosphate in natural waters. Anal Chim Acta. 27:31-36.
40. Olsen S.R., Kole C.W., Wantanabe F.S., and Dean L.A. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. Circular. US Dept of Agriculture, pp. 939.
41. Raiesi F. 2017. A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions. Ecol. Indic. 75: 307-320.
42. Reddy, K. R., Wetzel, R. G., and Kadlec, R. H. 2005. Biogeochemistry of phosphorus in wetlands. Phosphorus: Agric. Environ. 46: 263-316.
43. Rezapour, S., Taghipour, A., and Samadi, A. 2013. Modifications in selected soil attributes as influenced by long-term continuous cropping in a calcareous semiarid environment. Nat Hazards (Dordr). 69(3): 1951-1966.
44. Sharpley A.N., and Smith S. J.1985. Fractionation of inorganic and organic phosphorus in virgin and cultivate soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 49:127-130.
45. Sheklabadi, M., Mahmoudzadeh, H., Mahboubi, A. A., Gharabaghi, B., and Ahrens, B. 2014. Land use effects on phosphorus sequestration in soil aggregates in western Iran. Environ. Monit. Assess. 186: 6493-6503.
46. Six, J., K. Paustian, E.T. Elliott and C. Combrink. 2000. Soil structure and organic matter, I. distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. Soil Sci. Soc. Am. J. l (64): 681-689.
47. Solomon, D., Lehmann, J., Mamo, T., Fritzsche, F., and Zech, W. 2002. Phosphorus forms and dynamics as influenced by land use changes in the sub-humid Ethiopian highlands. Geoderma.105(1-2): 21-48.
48. Soltangheisi, A., de Moraes, M. T., Cherubin, M. R., Alvarez, D. O., de Souza, L. F., Bieluczyk, W., and de Camargo, P. B. 2019. Forest conversion to pasture affects soil phosphorus dynamics and nutritional status in Brazilian Amazon. Soil Tillage Res.194: 104-330.
49. Stutter, Marc I., Charles A. Shand, Timothy S. George, Martin SA Blackwell, Liz Dixon, Roland Bol, Regina L. MacKay, Alan E. Richardson, Leo M. Condron, and Philip M. 2015. Land use and soil factors affecting accumulation of phosphorus species in temperate soils. Geoderma. 257: 29-39.
50. Sui, Y., Thompson, M. L., Shang, C. 1999. Fractionation of phosphorus in a Mollisol amended with biosolids. Soil Sci. Soc. Am. J. 63: 1174–1180.
51. Tiessen H., Stewart J.W.B., and Moir J.O. 1983. Changes in organic and inorganic phosphorus composition of two grassland soils and their

particle size fractions during 60-90 years of cultivation. Soil Sci. 34: 815- 823.

52. Walker, T. W. and A. F. R. Adams. 1958. Studies on soil organic matter: I. Influence of phosphorus content of parent material on accumulation of carbon, nitrogen, sulfur and organic phosphorus in grassland soils. Soil Sci. 85:307-318.

53. Walky, A. and Black, I. A. 1934. An examination of detjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the choromic acid in soil analysis. Exprimental. Soil Sci. 79: 459-465.

54. Wang G.P., Liu J.Sh., Wang J.D., and Yu J.B. 2006. Soil phosphorus forms and their variations in depressional and riparian freshwater wetlands (Sanjiang Plain, Northeast China). Geoderma. 132(1-2): 59-74.

55. Wang, X., Yan, X., and Liao, H. 2010. Genetic improvement for phosphorus efficiency in soybean: a radical approach. Ann. Bot. 106(1):215-222.

پژوهش‌های خاک / الف / جلد ۳۸ / شماره۲ تابستان/ ۱۴۰۳/۱۶۳-۱۴۷
https://doi.org/10.22092/IJSR.2024.365959.753

# نقشه برداری رقومی شوری خاک با استفاده از داده‌های کمکی و مدل‌های یادگیری ماشین در حوضه آبخیز بدر، استان کردستان

مسلم زرینی بهادر *و رحمان شریفی

کارشناس تحقیقات خاک و آب مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان تهران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی(تات)، تهران، ایران.(نویسنده مسئول مقاله) ایمیل: ***Moslem.zarini@ymail.com***

استادیار زمین شناسی، عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان تهران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی(تات)، تهران، ایران: ***rahmansharifi@yahoo.com***

«مقاله پژوهشی»

دریافت: ۱۴۰۳/۴/۲۴ و پذیرش:۱۴۰۳/۷/۲۵

## چکیده

**استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و یادگیری ماشین به طور فزاینده‌ای به عنوان روش‌های مقرون به صرفه برای نمایش نقشه شوری خاک شناخته می‌شود. در این مطالعه از داده‌های ماهواره‌ای لندست ۸ و تکنیک‌های پیچیده یادگیری ماشینی برای ترسیم و ارزیابی سطوح شوری خاک در حوضه آبخیز بدر استفاده گردید. به این منظور، از چندین تکنیک یادگیری ماشین در نرم افزار R برای پیش‌بینی مقادیر شوری در حوضه آبخیز بدر استفاده شد. این الگوریتم‌ها نزدیک ترین همسایه K (KNN) ، تحلیل درخت تصمیم (DTA)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، جنگل تصادفی (R.F.) و رگرسیون چند متغیره خطی ترکیبی(MLR) را در بر می‌گرفت.. برای انجام این مطالعه، بر اساس تکنیک ابر مکعب لاتین، محل ۱۲۵ خاک‌رخ در منطقه مطالعاتی انتخاب و حفر شد. نمونه‌های خاک، پس از هوا خشک شدن در محیط آزمایشگاه، کوبیده شد و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. سپس شوری خاک اندازه‌گیری گردید. برای برآورد ویژگی‌های خاک، دو حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در حالت اول، مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی، تحلیل درخت تصمیم و رگرسیون چند متغیره خطی برای پیش‌بینی استفاده شد. همچنین، برای ترکیب نتایج مدل‌ها، از مدل نزدیک‌ترین همسایه استفاده شد. نتایج این مطالعه نشان داد که متغیرهای کمکی مهم در پیش‌بینی شوری خاک به ترتیب اهمیت عبارت‌اند از: ژئومورفولوژی، عمق دره، شاخص همواری قله برآمدگی با درجه تفکیک بالا، شاخص خیسی، جهت شیب، مدل رقومی ارتفاع، شیب حوضه، موقعیت نسبی شیب، مقدار شیب و طول شیب. همچنین، نتایج ارزیابی مدل‌ها نشان داد که در میان مدل‌های استفاده‌شده برای پیش‌بینی شوری، مدل رگرسیون چند متغیره خطی ترکیبی(MLR) با ضریب تعیین ۰/۶۱۱ و ریشه دوم متوسط مربعات خطا ۰/۰۳۲ از بیشترین دقت برای پیش‌بینی برخوردار بوده است.**

**واژه‌های کلیدی:** لندست ۸، الگوریتم نزدیک ترین همسایه، تحلیل درخت تصمیم، شبکه عصبی مصنوعی، جنگل تصادفی ، رگرسیون چند متغیره خطی ترکیبی

* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: ***Moslem.zarini@ymail.com***

**مقدمه**

شوری خاک یک چالش مهم در بسیاری از مناطق در سراسر جهان از جمله ایران است. پیامدهای بالقوه شامل تأثیرات منفی بر عملکرد محصول، رفاه انسان و سیستم‌های زیست‌محیطی است. استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و یادگیری ماشین به طور فزاینده‌ای به عنوان روش‌های مقرون به صرفه برای نمایش نقشه شوری خاک شناخته می شود (الشوی و همکاران، ۲۰۲۴).

شوری خاک در حال حاضر یک مشکل جدی زیست محیطی است که در سطح جهانی با آن مواجه هستیم (لی و همکاران، ۲۰۱۴). شوری خاک به شدت بر تولید کشاورزی، تعادل اکولوژیکی و توسعه پایدار تأثیر می‌گذارد (وانگ و همکاران، ۲۰۱۲؛ بوکسیلا و همکاران، ۲۰۱۳؛ کانیدو و همکاران، ۲۰۱۳). بنابراین، درک سطوح شوری خاک برای تعیین زمان بندی بهینه آبیاری، اجرای شیوه‌های مدیریت موثر، تضمین کیفیت خاک، تقویت رشد گیاه قوی و حفظ منابع آب بسیار مهم است (اسکودیرو و همکاران، ۲۰۱۷). با توجه به این زمینه، انجام یک بررسی جامع از پویایی مکانی و زمانی شوری به عنوان یک ضرورت مبرم برای حفاظت از منابع زمین، حفظ تعادل اکولوژیکی و تضمین بهره‌وری کشاورزی پدیدار شده است.

روش‌های مرسوم برای اندازه‌گیری شوری خاک معمولاً شامل جمع‌آوری نمونه‌های خاک مزرعه برای آنالیز آزمایشگاهی برای تعیین غلظت املاح است. با این حال، چنین روش‌هایی زمان بر و پرهزینه هستند (دنت و همکاران، ۱۹۸۱؛ نانی و همکاران، 2006؛ دهان و همکاران، ۲۰۱۰). در سال‌های اخیر، استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور برای ارزیابی شوری خاک به دلیل زمان اندازه‌گیری کوتاه، دامنه نظارت گسترده، و ظرفیت به دست آوردن داده‌های چند زمانی افزایش یافته است (آسفاو و همکاران، ۲۰۱۸؛ گرجی و همکاران، ۲۰۱۷). به طور خاص، فناوری سنجش از دور ابزارهای کارآمد و مقرون به صرفه را برای پایش سریع شوری خاک ارائه می‌دهد. تکنیک‌های پایش را میتوان به دو دسته تقسیم کرد، یعنی ارزیابی مستقیم خاک لخت و ارزیابی غیرمستقیم از طریق پوشش گیاهی تحت تأثیر شوری خاک (موگنوت، ۱۹۹۳). اخیراً محققان ارتباطی بین اطلاعات رشد پوشش گیاهی و غلظت شوری خاک از طریق شاخص‌های پوشش گیاهی تعیین کرده‌اند (وانگ و همکاران، ۲۰۲۱). علاوه بر این، تعداد فزاینده‌ای از مطالعات شاخص شوری و شاخص ترکیبی آن را برای پایش شوری خاک اتخاذ کرده‌اند (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۲. دینگ و همکاران، ۲۰۱۲). استفاده از متغیرهای محیطی مانند ارتفاع، شیب و جهت، پتانسیل بالایی برای شناسایی دقیق خاک‌های شور دارد؛ که با افزایش ارتفاع، رطوبت خاک افزایش یافته و شوری کاهش می‌یابد و همچنین در شیب های رو به شمال به دلیل نگهداشت بیشتر رطوبت در خاک سبب کاهش شوری خاک می‌گردد (تریکی فوراتی و همکاران، ۲۰۱۷). تحقیقات قبلی همبستگی بین این شاخص‌ها و شاخص های شوری خاک را نشان داده است (الهارتی و همکاران، ۲۰۱۶). بسیاری از محققان شوری خاک را با ایجاد رابطه بین شاخص های مختلف (به عنوان مثال، شاخص‌های طیفی) و شوری خاک اندازه‌گیری شده، انتخاب عوامل وارونگی بهینه و ساخت مدل های وارونگی از طریق داده‌های سنجش از دور ماهواره‌ای متنوع را پیش-بینی کرده‌اند (وو و همکاران، ۲۰۲۱؛ شی و همکاران، ۲۰۲۱).

اکثر تحقیقات مرتبط قبلی، بر مدل‌های تجربی تکیه دارند. با این حال، Google Earth Engine (GEE) داده‌های سری Landsat تصحیح‌شده را همراه با رابطه‌های الگوریتم یادگیری ماشین ارائه می‌دهد. این منابع امکان استفاده از روش‌های یادگیری ماشینی در مقیاس بزرگ (جیانگ و همکاران، ۲۰۱۹. وانگ و همکاران، ۲۰۱۲. باربوچی و همکاران، ۲۰۱۴) و یادگیری عمیق (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۰؛ تیان و همکاران، ۲۰۱۹) را فراهم می‌کند که از داده-های ابری گسترده و قدرت محاسباتی استفاده می‌کند. چنین مدل‌هایی توانایی نظارت بر شوری خاک را افزایش می-دهند. علاوه بر این، محققان از شاخص‌های پوشش گیاهی برای ساخت مدل‌هایی در GEE برای مطالعه شوری خاک

استفاده کرده‌اند (ما و همکاران، ۲۰۲۳). در حال حاضر، ادغام GEE و یادگیری ماشین برای نقشه‌برداری زمین‌های زراعی (دانگ و همکاران، ۲۰۱۶؛ ژیانگ و همکاران، ۲۰۱۷)، تخمین دمای سطح (پاراستاتیدیس و همکاران، ۲۰۱۷) و نظارت بر طبقه‌بندی (براولی و همکاران، ۲۰۲۰) استفاده می‌شود. البته در این مطالعه ما از نرم افزار R برای تجزیه و تحلیل داده‌ها و به عنوان پلت فرم اصلی در این مطالعه استفاده نمودیم.

اهداف این مطالعه عبارتند از: انتخاب بهترین مدل پیش‌بینی کننده شوری خاک، بررسی دقت و صحت مدل‌های یادگیری ماشین، تهیه نقشه‌های توزیع مکانی شوری خاک در حوضه آبخیز بدر و تحلیل تغییرات شوری خاک در حوضه آبخیز بدر.

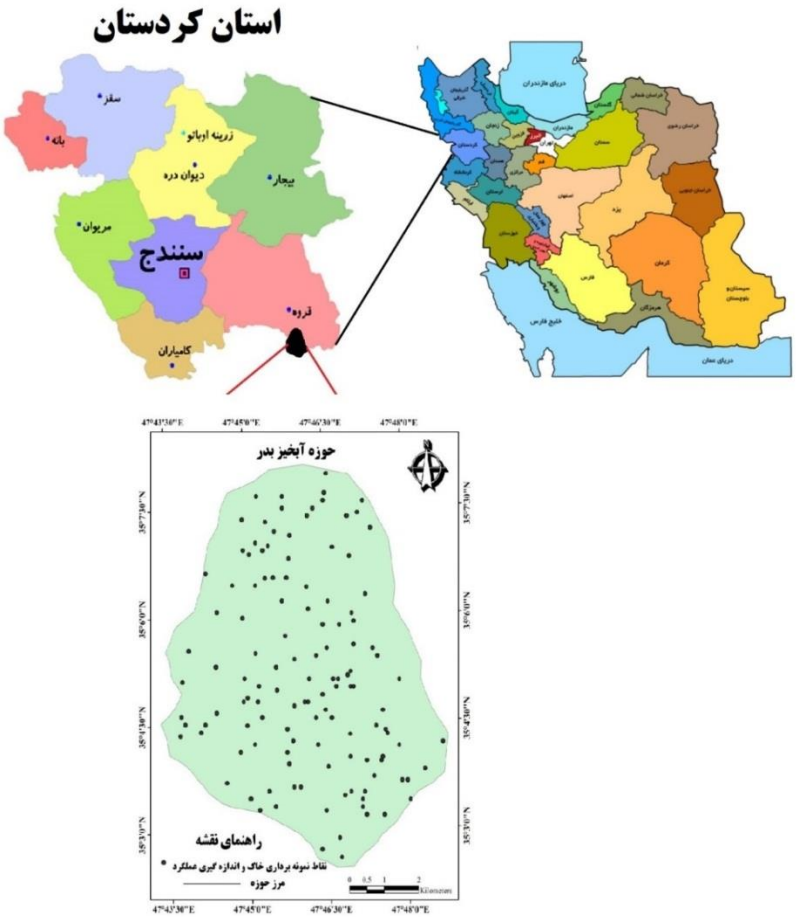
## مواد و روش‌ها

### وضعیت عمومی منطقه موردمطالعه

اراضی موردمطالعه با وسعتی حدود ۶۷۰۰ هکتار در جنوب شهر ستان قروه و بین مختصات جغرافیائی ۴۷ درجه و ۴۳ دقیقه و ۴۷ درجه و ۴۹ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۲ دقیقه و ۳۵ درجه و ۸ دقیقه عرض شمالی واقع‌شده است (شکل ۱).

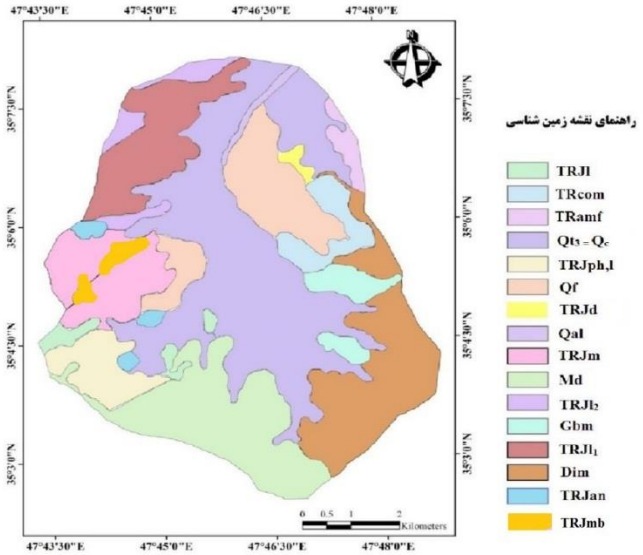
مطابق با آمار طولانی‌مدت هواشناسی، متوسط درجه حرارت سالیانه‌ی هوا ۱۲/۰۷ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارندگی سالیانه ۳۴۵/۸ میلی‌متر است. الگوی بارش، مدیترانه‌ای بوده و بخش اعظم بارندگی در فصول سرد سال اتفاق می‌افتد. بر اساس اقلیم نمای آمبرژه، اقلیم این ناحیه نیمه‌خشک و سرد است. در منطقه موردمطالعه، رژیم رطوبتی خاک زریک (Xeric) و رژیم حرارتی آن مزیک (Mesic) تعیین‌شده است.

قدیمی‌ترین واحد چینه‌شناسی در منطقه، تریاس است. رسوبات تریاس از دولومیت کاملاً بلورین و خردشده تشکیل‌شده است. روی این واحد چینه‌ای را شیل، شیست و ولکانیک‌های مشابه با سازند شمشک در البرز مرکزی، به سن ژوراسیک، می‌پوشانند. آخرین توالی رسوبی به ظاهر پیوسته مزوزوئیک- ترشیاری، شیل ها و ماسه‌سنگ‌های دارای عدسی‌های آهکی به همراه سنگ‌های آتش‌فشانی هستند که به‌طور عمده همساز بر روی رسو بات کر تاسه بالائی ( پالئوسن) قرار دار ند (حریری،۱۳۷۴). اصلی‌ترین رخداد کوهزایی در این منطقه مربوط به کوهزایی کیمرین میانی است که سبب دگرگونی سنگ‌های رسوبی- آتش‌فشانی (تریاس-ژوراسیک) گردیده و حا صل آن تشکیل مرمر، آمفیبولیت، شیست و فیلیت است (شکل ۲) (حسینی، ۱۳۷۶).




**شکل ۱ – موقعیت منطقه مطالعاتی و پراکنش مکانی نقاط نمونه‌برداری**

از لحاظ ژئومرفولوژی، حوزه‌ی آبخیز موردمطالعه شامل کوه و اراضی پای کوهی (پیدمونت) است. کاربری‌های رایج اراضی کشاورزی، گندم دیم و آبی، جو دیم و آبی، نخود، لوبیا، یونجه، شبدر و... است.




**شکل ۲- زمین‌شناسی حوضه آبخیز بدر شهرستان قروه، استان کردستان**

## روش اجرا

برای اجرای این پژوهش مراحل زیر، طبق شکل ۳ انجام گرفت:

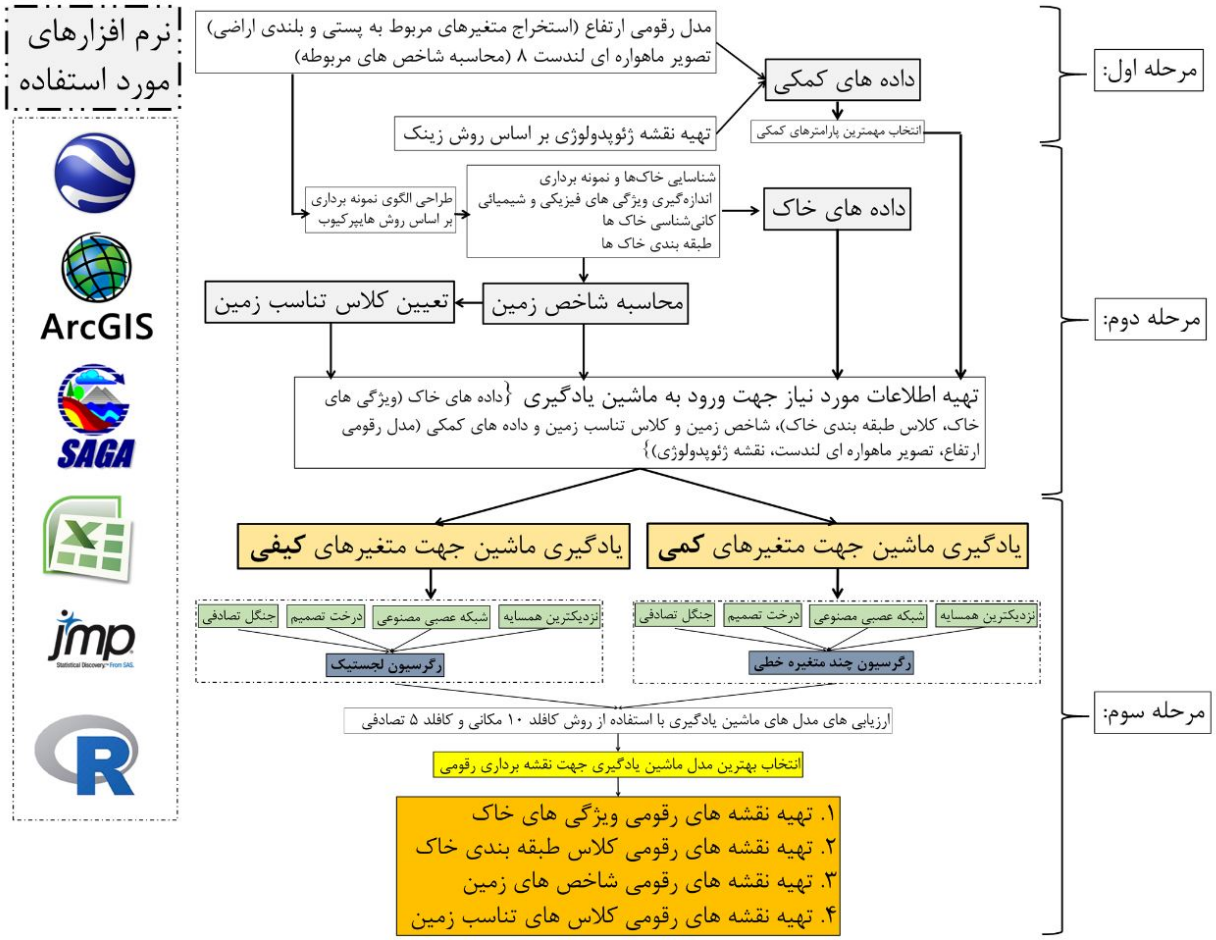
در مرحله‌ی اول، داده‌های کمکی ازجمله: تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر منطقه از سازمان نقشه‌برداری کشور تهیه گردید. نقشه‌ی زمین‌شناسی قروه از سایت زمین‌شناسی کشور تهیه و نقشه زمین‌شناسی حوضه آبخیز بدر از آن استخراج و در محیط سامانه اطلاعات جغرافیائی رقومی گردید. نقشه‌ی ژئومرفولوژی با استفاده از نقشه زمین‌شناسی و بر اساس روش ژئوپدولوژی زینک در محیط سامانه اطلاعات جغرافیائی ترسیم گردید. در مرحله‌ی دوم، محل نقاط مشاهداتی تعیین، شناسایی خاک‌ها در صحرا، نمونه‌برداری از لایه‌های مختلف خاک، اندازه گیری های فیزیکی و شیمیائی و کانی شناسی خاک‌ها انجام و خاک‌ها طبقه‌بندی شدند. در مرحله سوم، مدل سازی انجام، نقشه‌ی ویژگی‌های خاک تهیه و ارزیابی مدل‌ها صورت گرفت.

## جمع‌آوری داده‌های متغیرهای کمکی، پردازش و فرآیند انتخاب مهم‌ترین آن‌ها

در پژوهش حاضر، از سه منبع برای تهیه داده‌های کمکی بهره گرفته شد: تصاویر ماهواره‌ای، مدل رقومی ارتفاع و نقشه ژئومورفولوژی. مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر مبنای کار قرار گرفت. در این مرحله، با استفاده از این مدل و زیربرنامه‌های تعریف‌شده‌ی استاندارد موجود در نرم‌افزار Arc-GIS10 و ساگا (System for Automated Geoscientific Analyses, SAGA) مشتقات مختلف مرتبه‌های اول و دوم مدل تهیه شد. شاخص‌های سنجش‌از دور نیز با استفاده از داده‌های باندهای ۱ تا ۶ ماهواره‌ی لندست ۸ (سال ۲۰۱۳) محاسبه شدند.

تفکیک واحدهای ژئومرفیک موجود در منطقه مطالعاتی با توجه به تفاوت رنگ، الگوی آبراهه‌ای، شیب، شکل شیب و ارتفاع که در تصاویر سه‌بعدی گوگل ارث قابل‌مشاهده هستند، بر اساس نقشه زمین‌شناسی و سامانه سلسله مراتبی زینک (زینک، ۱۹۸۹) انجام شد. این سامانه از بالاترین تا پایین‌ترین سطح طبقه‌بندی شامل زمین‌نما (Landscape)، پستی‌وبلندی (Relief) و یا قالب (Molding)، سنگ و مواد مادری (Lithology) و شکل زمین (Landform) است. به‌منظور نشان دادن رابطه بین زمین ریخت (Geoform) و خاک، خاک (های) مربوط به هر شکل زمین نیز معرفی گردید. در پایان، نقشه ژئومرفولوژی در سامانه اطلاعات جغرافیائی (GIS) رقومی گردید.

برای انتخاب پارامترهای موثر در مدل‌سازی، از روش «انتخاب ویژگی به ترتیب اهمیت» استفاده شد. به این معنی که تمام اطلاعات کمکی پس از استخراج از نرم‌افزار ساگا، وارد نرم‌افزار وکا (Weka) گردید و با استفاده از الگوریتم ReliefAttributeEval، اطلاعات کمکی مهم و مؤثر در پیش‌بینی ویژگی‌ها و کلاس‌های طبقه‌بندی خاک و رده‌بندی کیفی تناسب اراضی به ترتیب اهمیت، انتخاب و در مدل سازی مورداستفاده قرار گرفت. این الگوریتم، ارزش یک زیرمجموعه از ویژگی‌ها، با در نظر گرفتن توانایی پیش‌بینی فردی هر یک از آن‌ها و همچنین میزان فراوانی بین آن‌ها را ارزیابی می‌کند. در این الگوریتم، زیرمجموعه فوق‌الذکر که با ویژگی‌ها و کلاس‌های مورد پیش‌بینی همبستگی بالایی دارند، درحالی‌که همبستگی درونی آن‌ها کم است، ترجیح داده می‌شوند.




**شکل ۳- مراحل اجرای پژوهش**

## جمع‌آوری داده‌های خاک و عملکرد محصول

در نقشه‌برداری رقومی خاک، شبکه نمونه‌برداری (مکان‌های نمونه‌برداری) خاک برای ایجاد روابط کمی بین خاک و متغیرهای محیطی تأثیر بنیادین دارد. با توجه به اهمیت این موضوع، در تحقیق حاضر، برای افزایش کارایی مدل‌های نقشه‌برداری رقومی، نسبت به استفاده از روش نمونه‌برداری ابرمکعب لاتین (میناسنی و مک براتنی، ۲۰۰۶) اقدام شد. این تکنیک، یک روش نمونه‌برداری مونت کارلوی محدودشده و یک طرح تصادفی طبقه‌بندی‌شده است که به کمک توزیع چند متغیره، نمونه‌برداری قابل قبولی را باعث می‌شود. بر اساس تکنیک ابر مکعب لاتین، محل ۱۲۵ خاک رخ در منطقه مطالعاتی انتخاب شد. در این تحقیق از نرم افزار R برای مشخص کردن نقاط حفر خاکرخ‌ها استفاده و داده‌های استفاده شده برای وارد کردن به نرم افزار مشتمل بر DEM، RS و نقشه ژئومورفولوژی بودند. موقعیت تمامی خاک رخ‌ها توسط سیستم موقعیت-یاب جهانی (GPS) ثبت گردید.

مطالعات خاکشناسی برای تهیه‌ی نقشه‌های رقومی کلاس-های خاک و ویژگی‌های آن انجام گردید و فاصله پروفیل‌ها از یکدیگر بر اساس روش ابر مکعب لاتین تعیین شد. خاک‌رخ‌ها بر اساس راهنمای تشریح و نمونه‌برداری خاک‌ها در صحرا (شوئنبرگر و همکاران، ۲۰۱۲) تشریح و از تمامی افق‌های آن‌ها نمونه‌برداری صورت گرفت. سطوح مختلف ژئومرفولوژی نیز برای هر پروفیل یادداشت‌برداری شد.

## اندازه‌گیری مشخصات فیزیکی و شیمیائی خاک

برای برداشت نمونه‌های خاک از تمامی افق‌های خاک‌رخ خاک نمونه برداشته شد. بعضی خاک‌رخ‌های خاک کم عمق و بعضی‌ها عمیق‌تر بودند که نمونه‌برداری از تمامی افق‌های خاک‌رخ‌ها برای انجام رده‌بندی مورد نیاز بود. اما

نهایتاً برای اندازه گیری شوری خاک متوسط وزنی عمق ۵۰ سانتیمتری اندازه گیری و محاسبه گردید. نمونه‌های خاک، پس از هوا خشک شدن در محیط آزمایشگاه، کوبیده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. سپس ویژگی‌های خاک ازجمله شوری خاک اندازه‌گیری گردید. شوری خاک یا همان EC را به طریقه‌ی عصاره‌گیری از گل اشباع به دست آوردیم و آن از طریق قرار دادن پروب EC متر در عصاره ی اشباع حاصل از گل به دست آمد.

## پردازش اطلاعات

متوسط وزنی عمق ۵۰ سانتیمتری هدایت الکتریکی خاک (شوری) برای نقشه‌برداری رقومی ویژگی‌های خاک بکار رفت. به منظور محاسبه متوسط وزنی، مقدار هر ویژگی در افق‌های خاک، ضخامت هر افق و ضریب وزنی عمق (گیوی، ۱۳۷۶) مورد استفاده قرار گرفت.

## یادگیری ماشین

### الف- مدل‌های یادگیری ماشین، بکار رفته در این تحقیق

در این پژوهش، جهت برآورد داده‌های کمی خاک مانند شوری خاک از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی، نزدیک-ترین همسایه، آنالیز تشخیصی، درخت تصمیم و جنگل تصادفی در نرم افزار R استفاده گردید. علاوه بر این، از مدل رگرسیون چند متغیره خطی و رگرسیون لجستیک جهت ترکیب مدل‌های مذکور نیز بهره گرفته شد.

### ب- ارزیابی مدل‌های یادگیری ماشین

در این پژوهش، جهت ارزیابی مدل‌های یادگیری ماشین از دو روش بهره گرفته شد: ارزیابی متقابل تصادفی و ارزیابی تصادفی مکانی. در این نوع اعتبارسنجی‌ها، داده‌ها به K زیرمجموعه دسته‌بندی شدند. از این K زیرمجموعه، هر بار یکی برای اعتبارسنجی و K-1 تای دیگر برای آموزش بکار رفتند. این روال، K بار تکرار شد و همه داده‌ها دقیقاً یک‌بار برای آموزش و یک‌بار برای اعتبارسنجی بکار رفتند. درنهایت، میانگین نتیجه این K بار اعتبارسنجی به‌عنوان یک تخمین نهایی برگزیده شد. لازم به ذکر می‌باشد که تفاوت ارزیابی متقابل تصادفی و ارزیابی تصادفی مکانی، در انتخاب مجموعه داده‌های خاک جهت آموزش و ارزیابی می‌باشد. در روش ارزیابی متقابل تصادفی، داده‌های به طور تصادفی به دو دسته تقسیم می‌شوند: داده هائی که برای آموزش به‌کار می‌روند و داده‌هائی که برای اعتبار سنجی یا آزمون مورد استفاده قرار می‌گیرند. در چنین شرایطی ممکن است داده‌های آموزش و آزمون از لحاظ مکانی در کنار یکدیگر در فاصله بسیار نزدیک قرار گیرند. اما در روش ارزیابی متقابل مکانی، در ابتدا منطقه مطالعاتی به تعدادی قطعه، تقسیم‌بندی شده و سپس داده‌های قرار گرفته در یک قطعه جهت ارزیابی مدل استفاده شده و بقیه قطعه‌ها برای آموزش مدل به‌کار می‌روند. در چنین شرایطی، می‌توان مطمئن شد که مدل آموزش دیده، در کل منطقه مورد ارزیابی قرار گرفته است (ولاوی و همکاران، ۲۰۱۸).

در این پژوهش، برای بیان کمی میزان خطا از معیارهای معمول در یادگیری ماشین استفاده گردید. بدین منظور، جهت بررسی دقت و صحت مقادیر پیش‌بینی‌شده داده‌های کمی خاک مانند درصد رس توسط مدل‌های یادگیری ماشین شاخص‌هایی از قبیل جذر میانگین مربع خطا (Root Mean Square Error: RMSE) و جذر میانگین مربع خطای نسبی (Relative RMSE: RMSE%)، ضریب تعیین ($R^2$) و ضریب همبستگی (r) محاسبه گردیدند. روابط ریاضی شاخص¬های مذکور بدین صورت می¬باشد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(x'-x)^2}{n}}$$

در این رابطه، $x'$ مقدار برآورد شده در نقطه‌ی $x_i$، $x$ مقدار مشاهده در نقطه‌ی $x_i$ و n تعداد نقاط است.

$$RMSE\% = \frac{RMSE}{\bar{x}} * 100$$

در این رابطه، $\bar{x}$ میانگین مقادیر واقعی مشاهدات است.

**برخی از مدل‌های به‌کاربرده شده در نقشه‌برداری رقومی خاک**

**رگرسیون لوجیستیک**

در تحلیل‌های چندمتغیره، چنانچه متغیر وابسته، دوحالتی (دو ارزشی) باشد از مدل رگرسیون لوجیستیک استفاده می‌شود (هاسمر و لم‌شو، ۲۰۰۰). در این مدل، متغیر وابسته بیانگر دو وضعیت است که این وضعیت می‌تواند به‌صورت بلی یا خیر و یا وجود و عدم وجود وضعیت به‌صورت صفر و یک بیان گردد. مدل لوجیستیک، به‌طور موفقیت‌آمیزی در علوم خاک و ارتباط خاک با انواع ویژگی‌های محیطی استفاده می‌شود. این مدل، احتمال حضور یک کلاس خاک را به متغیرهای محیطی پیش‌بینی کننده ارتباط می‌دهد. هنگل و همکاران (۲۰۰۷) موفقیت رگرسیون لوجیستیک چندجمله‌ای را در پیش‌بینی گروه‌های مرجع خاک سامانه‌ی طبقه‌بندی جهانی (WRB) گزارش نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که موفقیت مدل، شدیداً به همبستگی کلاس‌های خاک با پیش‌بینی کننده‌ها (عوامل محیطی به‌کاربرده شده در مدل) بستگی دارد. جعفری و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از مدل رگرسیون لوجیستیک دوتایی، احتمال حضور افق سالیک را در سیمای اراضی پلایا، افق جیپسیک را در تپه‌های گچی و افق کلسیک را در مخروط‌افکنه، در منطقه‌ی زرند کرمان پیش‌بینی و سپس با ترکیب حضور یا عدم حضور افق‌های مشخصه، کلاس‌های خاک را پیش‌بینی نمودند.

**شبکه‌های عصبی مصنوعی**

رایانه‌ها، دارای سرعت قابل‌توجهی نسبت به انسان می‌باشند؛ ولی قدرت تفکر ندارند و در هنگام کمبود اطلاعات و یا وجود داده‌های پرت، عملکرد آن‌ها به شدت کاهش می‌یابد و رضایت‌بخش نیست. ازآنجاکه داده‌هایی که در دسترس پژوهشگران هستند، معمولاً محدود و گاه پرت می‌باشند؛ ایده‌ی شبکه‌های عصبی مصنوعی که یک سامانه‌ی محاسباتی هوشمند و دارای قدرت یادگیری است، مطرح گردید. مبنای شبکه‌های عصبی مصنوعی روابط پیچیده‌ی ریاضی منطبق بر سامانه‌ی عصبی انسان است. در روش شبکه‌های عصبی مصنوعی، سه لایه‌ی ورودی، پنهان و خروجی وجود دارد و این لایه ها با یکدیگر در ارتباط هستند. در این روش، از طریق وزن دهی داده‌های ورودی توسط فرد و در حقیقت آموزش سیستم، وزن نهایی به دست می‌آید ( صالحی و خادمی، ۱۳۸۷). بهرنس و همکاران (۲۰۰۵) برآورد واحدهای خاک را با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و با به‌کارگیری داده‌های رقومی ارتفاع انجام داده و بیان نمودند که ترکیب تکنیک شبکه‌های عصبی مصنوعی و اطلاعات به‌دست‌آمده از مدل رقومی ارتفاع، علاوه بر صرفه‌جویی در زمان و هزینه‌ها، نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد.

**روش خطی**

مدل‌های خطی، شامل مدل رگرسیون برای پیش‌بینی ویژگی‌های خاک و پیش‌بینی کلاس‌های خاک می‌باشند. هنگل و همکاران (۲۰۰۲) بر اساس اطلاعات مدل رقومی ارتفاع و با به‌کار بردن مدل رگرسیون خطی، ضخامت افق سطحی و میزان ماده‌ی آلی را پیش‌بینی کردند. محنت کش و همکاران (۲۰۱۳) مهم‌ترین ویژگی‌های توپوگرافی (شیب، شاخص خیسی، سطح حوضه و شاخص انتقال رسوب) در تعیین عمق خاک را با استفاده از مدل رگرسیون خطی چندمتغیره در مناطق تپه‌ماهوری غرب ایران (منطقه‌ی کوهرنگ استان چهارمحال و بختیاری) مشخص نمودند.

**رگرسیون درختی توسعه‌یافته**

مهم‌ترین مزیت این روش نسبت به سایر روش‌ها، تفسیر آسان نتایج است. به همین دلیل، این روش به‌صورت گسترده‌ای در پیش‌بینی ویژگی‌های خاک به‌کار می‌رود. پاچ‌پسکی و همکاران (۲۰۰۱) با استفاده از مدل رگرسیون درختی و مشتقات مدل رقومی ارتفاع (شیب و انحنای خالص)، میزان شن، سیلت و ظرفیت نگهداری آب را پیش‌بینی نمودند. جعفری و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده

از مدل رگرسیون درختی توسعه‌یافته و متغیرهای کمکی (نقشه‌ی ژئومرفولوژی، اجزای سرزمین و شاخص‌های سنجش‌ازدور) احتمال حضور افق‌های مشخصه در منطقه‌ی زرند کرمان را تخمین زدند. نتایج نشان داد که نقشه‌ی ژئومرفولوژی، ابزاری مهم در روش‌های نقشه‌برداری رقومی خاک است که به افزایش دقت پیش‌بینی کمک شایانی می‌نماید.

**مدل آنالیز تشخیصی**

تحلیل تشخیصی و رده‌بندی، تکنیک‌های چند متغیری هستند که با جدا کردن مجموعه‌های متمایز اشیاء (مشاهدات) و با تخصیص دادن اشیاء (مشاهدات) جدید به دسته‌های تعریف‌شده قبلی سروکار دارند. طبیعت تحلیل تشخیصی نسبتاً توضیحی است. درواقع تحلیل تشخیصی روشی است برای ترکیب کردن متغیرهای x1….xn برای ایجاد یک متغیر جدید y. این متغیر جدید که به نام تابع تشخیص شناخته‌شده، به گونه‌ایی ساخته می‌شود که مقدار هر شرکت‌کننده در آن تا حداکثر ممکن، افراد را در طبقه-های مختلف تفکیک کند. برای بیان ریاضی مطلب فوق، اگر فرض شود که متغیرهای x1….xn متغیرهای تشریحی، y یک متغیر وابسته و از نوع کیفی چند سطحی و هدف از آنالیز تشخیصی یافتن تابعی خطی مثل $y= \beta0+\beta1x1+ \beta2x2+…….\beta nxn$ باشد، در حالتی که متغیر وابسته شامل k سطح باشد، هدف آن است که مشاهدات جدید (x1,x2,….xn) بر اساس y به یکی از k گروه نسبت داده شوند.

هدف تحلیل تشخیصی، کلاس‌بندی موارد به دو گروه یا بیشتر بر اساس مجموعه‌ای از خصوصیاتی است که مورد را توصیف می‌کنند. به‌طورکلی، یک مورد بر اساس مشاهداتی که از آن به دست آورده می‌شود، به گروه‌های از پیش تعیین‌شده تخصیص داده می‌شود

تقی زاده مهرجردی و همکاران (۱۳۹۳) در مطالعه‌ای با عنوان نقشه برداری رقومی کلاس‌های خاک با استفاده از انواع روش‌های داده‌کاوی در منطقه‌ی اردکان یزد، مدل آنالیز تشخیصی را برای پیش‌بینی کلاس‌های خاک به کار بردند و به نتایج مثبتی در این زمینه دست یافتند، لازم به ذکر است که در مدل آنالیز تشخیصی متغیرهای کمکی پلی-گونی (نقشه ژئومورفولوژی) را نمی‌توان وارد کرد (لیو و همکاران، ۲۰۰۸).

**مدل میانگین‌گیری نزدیک‌ترین همسایهK** [1]

میانگین‌گیری نزدیک‌ترین همسایه K، ارزش پاسخ برای یک مشاهده داده‌شده را با استفاده از پاسخ‌های مشاهداتی در همسایه‌های محلی پیش‌بینی می‌کند. می‌توان از این مدل با یک پاسخ قطعی برای طبقه‌بندی و یک پاسخ پیوسته برای پیش‌بینی استفاده کرد (نِمِس و همکاران، ۲۰۰۶). این روش، یک روش ناپارامتری است که بر اساس فاصله تا مشاهدات همسایه، پایه‌گذاری شده است. به این دلیل، میانگین‌گیری نزدیک‌ترین همسایه K قادر به طبقه-بندی مشاهدات با استفاده از مرزهای ارزش پیش‌بینی نامنظم است. بااین‌حال، الگوریتم، حساس به پیش‌بینی کننده‌های بی‌ربط است؛ بنابراین انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌ها، قبل از اجرای مدل می‌تواند مفید باشد.

آنگوایلی (۲۰۰۵) معتقد است، روش نزدیک‌ترین همسایگی K دارای یکی از ساده‌ترین و کار آمدترین الگوریتم‌های آموزش جهت پیش‌بینی داده‌ها است. بنا به نظر نمس و همکاران (۲۰۰۶) و ذوالفقاری و همکاران (۲۰۱۳)، در این تکنیک، تعداد بهینه ای از نمونه‌های موجود در یک مجموعه که واجد شبیه ترین ویژگی‌ها به نمونه هدف باشند در نظر گرفته می‌شود و سپس با توجه به فواصل اقلیدسی نمونه‌های هدف و هر یک از نمونه‌های بانک مرجع، وزن‌دهی عناصر آموزش دهنده انجام می-پذیرد. در یک بانک داده مرجع خاک، K عدد از نزدیک-ترین (مشابه‌ترین) خاک‌ها به خاک مورد آزمون انتخاب می‌شوند و این خاک‌ها با توجه به میزان مشابهت به خاک مورد آزمون وزندهی می شوند. به این ترتیب که در ابتدا

[1] K Nearest Neighbors averaging (KNN)

فواصل اقلیدسی بین خاک مورد آزمون و تمامی خاک‌های مرجع محاسبه شده، سپس تعداد K عدد از نزدیک‌ترین خاک ها بر اساس فاصله به دست آمده، وزندهی می شوند. در انتها با توجه وزن هر یک از خاکها در مجموعه ای با Kعدد خاک (نزدیک ترین همسایه)، بر آوردی از داده های هدف که مورد آزمون واقع شده‌اند، صورت می پذیرد.

ایوبی و همکاران(۱۳۹۵) در مطالعه‌ای با عنوان مقایسه روش‌های K نزدیکترین همسایگی و شبکه عصبی مصنوعی برای پهنه‌بندی رقومی شوری خاک در منطقه‌ی چاه افضل اردکان، به این نتیجه دست یافتند که مدل K نزدیکترین همسایگی دارای دقت بیشتری نسبت به شبکه عصبی مصنوعی به منظور پیش‌بینی شوری خاک است، به طوری که این مدل به خوبی توانسته ارتباط قوی بین داده-های شوری خاک و اطلاعات محیطی برقرار کند.

## مدل تحلیل درخت تصمیم[۲]

مدل درختی طبقه‌بندی و رگرسیون، یک روش ناپارامتری الگوریتمی است که قادر است متغیرهای کمی یا متغیرهای طبقه‌بندی‌شده را بر اساس مجموعه‌ای از متغیرهای پیش‌بینی کننده کمی و کیفی برآورد کند. در این روش، مجموعه‌ای از شرط‌های منطقی به‌صورت یک الگوریتم با ساختار درختی برای طبقه‌بندی یا پیش‌بینی کمی یک متغیر به‌کار می‌رود. ایجاد درخت تصمیم دو مرحله دارد. مرحله اول، مرحله ایجاد و رشد درخت است. این مرحله شامل پیوند[۳] و انشعاب[۴] است. مرحله دوم، مرحله توقف و هرس[۵] است. هدف این مرحله به حداقل رساندن خطای پیش‌بینی است (اسکال و همکاران، ۲۰۰۵).

بعضی از مزایای استفاده از درخت تصمیم که مور و همکاران (۱۹۹۱) در مقایسه با سایر روش‌های طبقه‌بندی بیان کردند عبارت اند از:

الف- وقتی داده‌ها کمی و کیفی هستند، تفسیر کردن آن‌ها راحت‌تر است. ب- بسیار راحت تر با داده‌های گمشده یا داده‌های پرت برخورد می‌کند. ج- توانایی درک و تحلیل روابط غیر خطی خصوصیات خاک را دارد د- هیچ فرضیه-ای برای توزیع داده‌ها نیاز ندارد. **هـ**- بسیار راحت به روز می‌شود.

## مدل جنگل تصادفی

جنگل‌های تصادفی در حقیقت مجموعه‌هایی از درخت‌های پیش‌بینی‌کننده با احتمال و پراکندگی یکسان هستند. اساس این روش، انتخاب خطای داده‌های بزرگتر به عنوان خطای اصلی و ایجاد همبستگی بین خطاهای دیگر داده‌ها به ترتیب است. انتخاب خطای عمومی بر اساس بزرگترین داده‌ها، پیش بینی دقیق و قابل استنادی ارائه می-دهد. زمانی این پیش‌بینی دقیق تر می‌شود که داده‌های ورودی به مدل بدون اعمال تغییرات باشد (بریمان، ۲۰۰۱). کامرا و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از دو مدل رگرسیون لجستیک چند متغیره و جنگل های تصادفی اقدام به تهیه نقشه رقومی خاک کشور قبرس کردند که نتایج آنها نشان داد که مدل جنگل‌های تصادفی نسبت به مدل رگرسیون لجستیک چند متغیره از توانایی بالاتری برای پیش‌بینی کلاس‌های خاک منطقه برخوردار بوده و همچنین این پیش‌بینی با خطای کمتری نسبت به مدل دیگر همراه بوده است. سرینیواس و همکاران (۲۰۱۶) برای تهیه نقشه رقومی کربن آلی و غیر آلی در هندوستان اقدام به نمونه-برداری ۱۱۹۸ نقطه به روش طبقه بندی تصادفی کردند و پس از انجام آزمایشات روی نمونه ها نتایج را به همراه برخی داده‌های کمکی از جمله شاخص پوشش گیاهی، داده‌های اقلیمی، پوشش زمین و ... در مدل جنگل‌های تصادفی برازش دادند. مقدار ۲۵ درصد از کل نقاط نمونه-برداری به عنوان داده‌های اعتبار سنجی مدل انتخاب شد. نتایج آنها نشان داد که مقدار کربن آلی، کربن غیر آلی و مقدار مجموع ذخیره کربن خاک ها به ترتیب، ۲۲/۷۳ ،

[۲] Decision Tree Analysis (DTA)

[۳] Merging

[۴] Splitting

[۵] Pruning

۱۲/۸۳ و ۳۵/۵۵ پکا گرم می‌باشد. هیونگ و همکاران (۲۰۱۶) در مطالعه‌ای با عنوان مرور و مقایسه تکنیک‌های یادگیری ماشینی برای اهداف طبقه‌بندی در تهیه نقشه رقومی خاک، به این نکته اشاره کردند که مدل‌های جنگل-های تصادفی و مدل‌های درختی به دلیل سرعت در پردازش پارامتری و سهولت تفسیر داده های خروجی، مدل های مناسبی جهت استفاده در اهداف طبقه‌بندی هستند.

پهلوان راد و همکاران (۲۰۱۶) داده‌های حاصل از نتایج آزمایشگاهی در مطالعات میدانی حدود ۸۵۰۰۰ هکتار از اراضی استان گلستان در ایران را به منظور تهیه نقشه رقومی خاک منطقه تحت دو مدل جنگل های تصادفی و رگرسیون لجستیک چند متغیره برازش دادند که نتایج آنها نشان داد مدل جنگل‌های تصادفی به طور معنی داری نسبت به مدل رگرسیون لجستیک چند متغیره توانایی پیش بینی سری‌های خاک منطقه را داشته است. هنگل و همکاران (۲۰۱۵) در بخشی از آفریقا اقدام به تهیه نقشه رقومی خصوصیات خاک با دو مدل رگرسیون چندگانه خطی و جنگل های تصادفی کردند که نتایج اعتبار سنجی مدل‌ها نشان داد مدل جنگل های تصادفی توانسته به طور معنی‌داری دقت بیشتری نسبت به مدل رگرسیون خطی چندگانه از خود نشان دهد. هیونگ و همکاران (۲۰۱۴) اقدام به تهیه نقشه مواد مادری خاک با استفاده از متغیرهای کمکی و مدل جنگل‌های تصادفی کردند که نتایج آن‌ها نشان داد زمانی که از متغیرهای کمکی مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای و متغیرهای کمکی مدل رقومی ارتفاع به عنوان داده‌های ورودی به مدل استفاده شد، ضریب کاپای اعتبار سنجی مدل ۸۹/۶ درصد استخراج گردید.

## نتایج و بحث

متغیرهای کمکی مهم در پیش‌بینی شوری خاک، در منطقه موردمطالعه به ترتیب اهمیت در جدول ۱ ارائه‌شده‌است.

**جدول ۱- متغیرهای کمکی مهم در پیش‌بینی شوری خاک، به ترتیب اهمیت. برای هر ویژگی، از چپ به راست، از اهمیت متغیر کمکی کاسته می‌شود. درجه‌بندی اهمیت با به‌کارگیری الگوریتم ReliefAttributeEval نرم‌افزار WEKA مشخص گردید**

| ویژگی‌ها | متغیرهای کمکی مهم به ترتیب اهمیت |
|---|---|
| EC | Geomorphology, Valley depth, MRRTF, Topographic wetness index, Aspect, DEM, Catchment slope, Relative slope position, Slope, LS Factor |

نتایج ارزیابی صحت پیش‌بینی شوری خاک‌های موردمطالعه، با استفاده از روش اعتبارسنجی کافلد ۱۰ مکانی، در جدول ۲ ارائه‌شده است. این پیش‌بینی توسط مدل‌های نزدیک‌ترین همسایه K (KNN) ، تحلیل درخت تصمیم (DTA)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، جنگل تصادفی (R.F.) و رگرسیون چند متغیره خطی ترکیبی(MLR) صورت گرفته است. در میان مدل‌های استفاده‌شده برای پیش‌بینی شوری، مدل رگرسیون چند متغیره خطی ترکیبی(MLR) با ضریب تعیین ۰/۶۱۱ و ریشه دوم متوسط مربعات خطا ۰/۰۳۲ از بیشترین دقت برای پیش‌بینی برخوردار بوده است.

**جدول ۲- نتایج ارزیابی صحت پیش‌بینی شوری خاک، با استفاده از روش اعتبارسنجی کافلد ۱۰ مکانی. این پیش بینی توسط مدل‌های نزدیک ترین همسایه K (KNN) ، تحلیل درخت تصمیم (DTA)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، جنگل تصادفی (R.F.) و رگرسیون چند متغیره خطی ترکیبی(MLR) صورت گرفته است. میانگین داده‌های واقعی شوری خاک در منطقه مورد مطالعه برابر با ۰/۱۸ دسی سیمنس بر متر است**

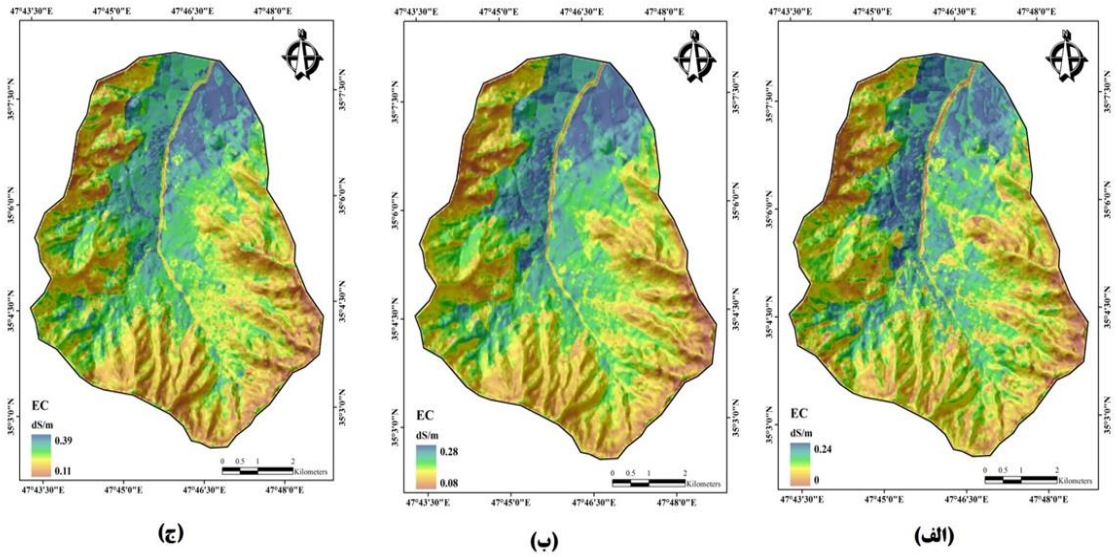
| مدل | RMSE | MAE | $R^2$ |
|---|---|---|---|
| KNN | ۰/۰۴۳ | ۰/۰۳۶ | ۰/۲۸۰ |
| DTA | ۰/۰۳۳ | ۰/۰۲۷ | ۰/۵۴۷ |
| ANN | ۰/۰۳۳ | ۰/۰۲۶ | ۰/۵۵۴ |
| RF | ۰/۰۳۲ | ۰/۰۲۵ | ۰/۶۰۹ |
| MLR | ۰/۰۳۲ | ۰/۰۲۵ | ۰/۶۱۱ |

در جدول ۲، دقت پیش‌بینی شوری، از بالا به طرف پائین افزایش می‌یابد. کمترین دقت پیش بینی به مدل نزدیک‌ترین همسایه K (KNN) ، اختصاص یافته است. این در حالی- است که با استفاده از روش اعتبارسنجی کافلد ۵ تصادفی (جدول ۳)، از بین مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی (Artificial Neural Network, ANN)، تحلیل درخت تصمیم (Decision Tree Analysis, DTA)، رگرسیون چند متغیره خطی (Multi Linear Regression, MLR) و نزدیک‌ترین همسایه K (K Nearest Neighbor)، مدل نزدیک‌ترین همسایه K ((Averaging) KNN) با ضریب تعیین ۰/۹۴۰۱ و ریشه دوم متوسط مربعات خطا ۰/۰۱۱۶ از بیشترین دقت برای پیش‌بینی برخوردار بوده است.

**جدول ۳- نتایج ارزیابی صحت پیش‌بینی شوری خاک، با استفاده از روش اعتبارسنجی کافلد ۵ تصادفی. این پیش بینی توسط مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی (Artificial Neural Network, ANN)، تحلیل درخت تصمیم (Decision Tree Analysis, DTA)، رگرسیون چند متغیره خطی (Multi Linear Regression, MLR) و نزدیک‌ترین همسایه K (K Nearest Neighbor)، صورت گرفته است**

| مدل | RMSE | $^{N}$RMSE=RMSE/Mean real | $r^{C}$ | $R^2$ | ME |
|---|---|---|---|---|---|
| ANN | ۰/۰۱۴۰ | ۰/۰۷۷۳۸ | ۰/۹۰۹۳ | ۰/۸۶۲۹ | -۰/۰۰۰۵۲ |
| DTA | ۰/۰۲۱۷ | ۰/۱۱۹۹۴ | ۰/۸۷۶۸ | ۰/۷۸۱ | ۰ |
| MLR | ۰/۰۳۲۸ | ۰/۱۸۱۲۹ | ۰/۸۰۲۵ | ۰/۶۷۰۱ | ۰ |
| KNN | ۰/۰۱۱۶ | ۰/۰۶۴۱۱ | ۰/۹۶۹۱ | ۰/۹۴۰۱ | ۰/۰۰۱۴۲ |

مقدار هدایت الکتریکی خاک بین ۰/۱۱۴ و ۰/۳۸۴ دسی زیمنس بر متر در تغییر است. مقدار این ویژگی خاک از کوه به‌طرف اراضی پای کوهی و پائین‌ترین دشت‌های آبرفتی (Qc) و از جنوب به شمال افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار شوری در خاک‌های شمال شرق حوضه آبخیز وجود دارد (شکل ۴). در شکل ۴، نقشه ب، پیش‌بینی مقدار میانگین، نقشه الف، پیش‌بینی با دامنه پراکندگی ۵ درصد کمتر از میانگین و نقشه ج، پیش‌بینی با دامنه پراکندگی ۵ درصد بیشتر از میانگین را نشان می‌دهند.




**شکل ۴- نقشه‌ی پیش‌بینی هدایت الکتریکی خاک با استفاده از مدل رگرسیون چند متغیره خطی ترکیبی. نقشه ب، پیش‌بینی مقدار میانگین، نقشه الف، پیش‌بینی با دامنه پراکندگی ۵ درصد کمتر از میانگین و نقشه ج، پیش‌بینی با دامنه پراکندگی ۵ درصد بیشتر از میانگین را نشان می‌دهند**

متغیرهای کمکی مهم در پیش‌بینی شوری خاک به ترتیب اهمیت عبارت‌اند از: ژئومورفولوژی، عمق دره، شاخص همواری قله برآمدگی با درجه تفکیک بالا، شاخص خیسی، جهت شیب، مدل رقومی ارتفاع، شیب حوضه، موقعیت نسبی شیب، مقدار شیب و طول شیب (جدول ۱) ژئومورفولوژی مهم‌ترین متغیر کمکی در پیش‌بینی مقدار شوری خاک محسوب می‌شود. قبلاً گفته شد که از کوه به‌طرف اراضی پای کوهی مقدار شوری افزایش می‌یابد (شکل ۴). در این جهت، مقدار رس خاک افزایش‌یافته و درنتیجه آب بیشتری در خاک نگه‌داشته‌شده و شاخص خیسی نیز افزایش می‌یابد. با تبخیر این آب، غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌های موجود در آن افزایش‌یافته و خاک شورتر می‌شود. ازنظر اهمیت برای پیش‌بینی مقدار شوری خاک، شاخص خیسی در درجه چهارم قرار دارد (جدول ۳). اهمیت جهت شیب در سطح پنجم است. شیب‌های شمالی و غربی از شوری کمتری برخوردار می‌باشند. مقدار شوری بستگی به ارتفاع از سطح دریا نیز دارد (اثر مدل رقومی ارتفاع). با افزایش ارتفاع از سطح دریا، از میزان شوری کاسته شده است (شکل ۴). آب بیشتر در اراضی مسطح و گود جمع می‌شود. با کم شدن شیب حوضه، خیسی خاک افزایش و به دلایلی که قبلاً در مورد اثر شاخص خیسی گفته شد، شوری نیز افزایش می‌یابد. شیب حوضه ازنظر تأثیرگذاری بر شوری در درجه هفتم اهمیت قرار دارد. در پشته‌های شیب که شیب بیشتر است، شوری نسبت به پای شیب که از شیب کمتری برخوردار است، کمتر است (اثر موقعیت نسبی شیب بر مقدار شوری). با افزایش شیب، شوری کاهش می‌یابد (اثر مقدار شیب بر شوری) (جدول ۳)

**جمع‌بندی نتایج پیش‌بینی ویژگی‌های خاک توسط مدل‌های استفاده شده در نقشه‌برداری رقومی این ویژگی ها**

جهت برآورد ویژگی‌های خاک، در مطالعه حاضر دو حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در حالت اول، مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی، تحلیل درخت تصمیم و رگرسیون چند متغیره خطی برای پیش‌بینی مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین جهت ترکیب نتایج مدل‌ها، از مدل نزدیک‌ترین همسایه استفاده گردید. نتایج این پیش‌بینی‌ها با استفاده از روش ارزیابی کافلد تصادفی ۵ مورد ارزیابی قرار گرفتند. در مرحله دوم، مدل‌های تحلیل درخت تصمیم، شبکه عصبی مصنوعی، نزدیک‌ترین همسایه و جنگل

تصادفی برای پیش بینی به‌کار رفتند. همچنین جهت ترکیب نتایج مدل‌ها در این حالت، از روش رگرسیون چند متغیره خطی ترکیبی استفاده گردید. با استفاده از روش ارزیابی کافلد مکانی ۱۰، نتایج پیش‌بینی مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج به طور کلی نشان داد که:

۱) بر اساس روش اعتبارسنجی کافلد ۱۰ مکانی، بهترین مدل برای پیش‌بینی تمام ویژگی‌های خاک، رگرسیون چند متغیره خطی ترکیبی است. برای همه ویژگی‌های خاک، مدل جنگل تصادفی، ازنظر قدرت پیش بینی، رتبه دوم را به خود اختصاص می‌دهد. به‌طورکلی، نزدیک‌ترین همسایه K، پائین‌ترین عملکرد را در پیش‌بینی همه ویژگی‌های خاک دارا بوده است.

۲) بر اساس روش اعتبارسنجی کافلد ۵ تصادفی، دقت و صحت مدل نزدیک‌ترین همسایه بهترین عملکرد را در پیش‌بینی همه ویژگی‌های خاک دارا بوده است.

۳) به طور کلی، بر اساس روش‌های ارزیابی کافلد ۱۰ مکانی و کافلد ۵ تصادفی، می توان بیان داشت که روش‌های ترکیبی دارای قابلیت بیشتری می‌باشند. این بدین معنی است که ترکیب نتایج پیش‌بینی سایر مدل‌ها می‌تواند نقشه‌هایی با دقت بالاتر را تولید کند.

## فهرست منابع


۱. ایوبی، ش.، تقی زاده، ر.، نمازی، ر.، ذوالفقاری، ع.، و روستایی صدرآبادی، ف. ۱۳۹۵. مقایسه روش‌های K نزدیکترین همسایگی و شبکه عصبی مصنوعی برای پهنه‌بندی رقومی شوری خاک در منطقه‌ی چاه افضل اردکان. *نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)*. سال بیستم. شماره ۷۶. صص. ۷۱-۵۹.

۲. تقی‌زاده مهرجردی، ر.، سرمدیان، م.، امید، م.، تومانیان، ن.، روستا، م.، و رحیمیان، م.، ۱۳۹۳. نقشه برداری رقومی کلاس‌های خاک با استفاده از انواع روش‌های داده‌کاوی در منطقه‌ی اردکان استان یزد. *مجله مهندسی زراعی(مجله علمی کشاورزی)*، جلد ۳۷، شماره۲. صص. ۱۱۵-۱۰۱.

۳. جعفری، ا.، خادمی، ح.، و ایوبی، ش. ۱۳۹۱. نقشه‌برداری رقومی افق‌های مشخصه و گروه‌های بزرگ خاک در منطقه زرند کرمان. *مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک*، شماره ۶۲. صص. ۱۷۷ تا ۱۹۱.

۴. حریری، ع. ۱۳۷۴. نگرشی بر خاستگاه گروهی از سنگ های دگرگونه گستره قروه. *پایان نامه کارشناسی ارشد*، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

۵. حسینی، م. ۱۳۷۶. شرح نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ چهار گوش قروه (پیوست نقشه)، *سازمان زمین شناسی و اکتشاف معدنی کشور*.

۶. صالحی، م. ح.، و خادمی، ح. ۱۳۸۷. مبانی نقشه‌برداری خاک. *انتشارات جهاد دانشگاهی اصفهان*. ۲۱۰ صفحه.

۷. گیوی، ج. ۱۳۷۶. ارزیابی کیفی تناسب اراضی برای نباتات زراعی و باغی، مؤسسه تحقیقات خاک و آب. *نشریه فنی شماره ۱۰۱۵*، ۱۰۰صفحه.

8. Anguilli, F. 2005. Fast condensed nearest neighbor rule. *Proceedings of the 22nd International Conference on Machine Learning*, Bonn, Germany.

9. Asfaw, E.; Suryabhagavan, K.; Argaw, M. Soil salinity modeling and mapping using remote sensing and GIS: The case ofWonji sugar cane irrigation farm, Ethiopia. *J. Saudi Soc. Agric. Sci*. 2018, 17, pp. 250–258.

10. Barbouchi, M.; Abdelfattah, R.; Chokmani, K.; Aissa, N.B.; Lhissou, R.; El Harti, A. Soil salinity characterization using polarimetric InSAR coherence: Case studies in Tunisia and Morocco. IEEE J. Sel. Top. *Appl. Earth Obs. Remote* Sens. 2014, 8,pp. 3823–3832.
11. Behrens, T. Forster, H. Scholten, T. Steninrucken, U. Spies, E. and Goldschmitt, M. 2005. Digital soil mapping using artificial neural networks. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 168: pp. 21-33.
12. Bouksila, F.; Bahri, A.; Berndtsson, R.; Persson, M.; Rozema, J.; Van der Zee, S.E. Assessment of soil salinization risks under irrigation with brackish water in semiarid Tunisia. *Environ. Exp. Bot.* 2013, 92, pp.176–185.
13. Breiman, L. 2001. "Random forests" Machine learning. 45, pp. 5-32.
14. Brovelli, M.A.; Sun, Y.; Yordanov, V. 2020. Monitoring forest change in the amazon using multi-temporal remote sensing data and machine learning classification on Google Earth Engine. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, 9, 580.
15. Camera, C. Z. Zomeni, J.S. Noller, A.M. Zissimos, I.C. Christoforou, B. and A. Bruggeman. 2017. A high resolution map of soil types and physical properties for Cyprus: A digital soil mapping optimization. *Geoderma* 285, pp.35-49
16. Cañedo-Argüelles, M.; Kefford, B.J.; Piscart, C.; Prat, N.; Schäfer, R.B.; Schulz, C.-J. 2013. Salinisation of rivers: An urgent ecological issue. *Environ. Pollut.*, 173, pp.157–167.
17. Dehaan, R.; Taylor, G. Field-derived spectra of salinized soils and vegetation as indicators of irrigation-induced soil salinization. *Remote Sens. Environ.* 2002, 80, pp. 406–417.
18. Dent, D.; Young, A. Soil Survey and Land Evaluation; George Allen & Unwin: Sydney, *NSW*, Australia, 1981.
19. Ding, J.-L.;Wu, M.-C.; Liu, H.-X.; Li, Z.-G. Study on the soil salinization monitoring based on synthetical hyperspectral index. Spectrosc. *Spectr. Anal.* 2012, 32, pp. 1918–1922.
20. Dong, J.; Xiao, X.; Menarguez, M.A.; Zhang, G.; Qin, Y.; Thau, D.; Biradar, C.; Moore III, B. Mapping paddy rice planting area in northeastern Asia with Landsat 8 images, phenology-based algorithm and Google Earth Engine. *Remote Sens. Environ*. 2016, 185, pp. 142–154.
21. El Harti, A.; Lhissou, R.; Chokmani, K.; Ouzemou, J.-E.; Hassouna, M.; Bachaoui, E.M.; El Ghmari, A. Spatiotemporal monitoring of soil salinization in irrigated Tadla Plain (Morocco) using satellite spectral indices. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 2016, 50, pp. 64–73.
22. Elshewy, M.A., Mohamed, M.H.A. & Refaat, M. 2024. Developing a Soil Salinity Model from Landsat 8 Satellite Bands Based on Advanced Machine Learning Algorithms. *J Indian Soc Remote Sens* 52, pp.617–632.
23. Gorji, T.; Sertel, E.; Tanik, A. 2017. Monitoring soil salinity via remote sensing technology under data scarce conditions: A case study from Turkey. *Ecol. Indic.*, 74, pp. 384–391.
24. Hengl, T. Rossiter, D.G. and Husnjak, S. 2002. Mapping soil properties from an existing national soil data set using freely available ancillary data. 17th World Congress of Soil Science. Thailand.
25. Hengl, T. Toomanian, N. Reuter, H. and Malakouti, M. J. 2007. Methods to interpolate soil categorical variables from profile observations: Lessons from Iran. *Geoderma* 140: pp. 417-427.
26. Hengl, T.; Heuvelink, G.B.M.; Kempen, B.; Leenaars, J.G.B.; Walsh, M.G.; Shepherd, K.D.; Sila, A.; MacMillan, R.A.; Jesus, J.; Tamene, L.; et al. 2015. Mapping Soil Properties of Africa at 250 m Resolution: Random Forests Significantly Improve Current Predictions. *PLoS ONE* , 10, 0125814.

27. Heung, B. Bulmer, C.E. and Schmidt, M.G. 2014. Predictive soil parent material mapping at a regional-scale: a random forest approach. *Geoderma*. 214, pp. 141-154.
28. Heung, B. H.C. Ho, J. Zhang, A. Knudby, C.E. Bulmer, and Schmidt, M.G. 2016. An overview and comparison of machine-learning techniques for classification purposes in digital soil mapping. *Geoderma*. 265, pp. 62-77
29. Hosmer, D.W. and Lemeshow, S. (2000). Applied logistic regression. John Wiley & Sons. New York. pp 392.
30. Jiang, H.; Shu, H. 2019. Optical remote-sensing data based research on detecting soil salinity at different depth in an arid-area oasis, Xinjiang, China. *Earth Sci. Inform*. 12,pp. 43–56.
31. Li, J.; Pu, L.; Han, M.; Zhu, M.; Zhang, R.; Xiang, Y. 2014. Soil salinization research in China: Advances and prospects. J. Geogr. Sci. 24, pp. 943–960.
32. Liu, J. Pattey, E. Nolin, M.C. Miller, J.R. and Ka, O. 2008. Mapping within-field soil drainage using remote sensing, DEM and apparent soil electrical conductivity. *Geoderma*,143, pp. 261–272.
33. Ma, S.; He, B.; Ge, X.; Luo, X. 2023. Spatial prediction of soil salinity based on the Google Earth Engine platform with multitemporal synthetic remote sensing images. Ecol. Inform. 75, 102111.
34. Mehnatkesh, A. Ayoubi, S. Jalalian, A. and Sahrawat, K. 2013. Relationships between Soil depth and terrain attributes in a semi arid hilly region in western Iran. *Journal of Mountain Science* 10, pp.163-172.
35. Minasny, B. and McBratney, A. B. 2006. A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. Computers and Geosciences 32, pp.1378-1388.
36. Moore, I. D. Grayson, R.B. and Ladson, A.R. 1991. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. Hydrological processes. 5, pp. 3-30.
37. Mougenot, B.; Pouget, M.; Epema, G. 1993. Remote sensing of salt affected soils. *Remote Sens. Rev*. 7, pp. 241–259.
38. Nanni, M.R.; Demattê, J.A.M. 2006. Spectral reflectance methodology in comparison to traditional soil analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70,pp. 393–407.
39. Nemes, A. Rawls, W.J. and Pachepsky, Y.A. 2006. Use of the nonparametric nearest neighbor approach to estimate soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal*, 70,pp. 327–336.
40. Pachepsky, Y.A. Timlin, D.J. and Rawls, W.J. 2001. Soil water retention as related to topographic variables. *Soil Science Society of America Journal* 65,pp. 1787–1795.
41. Pahlavan Rad, M. R. Khormali, F. Toomanian, N. Brungard, C.W. Kiani, F. Komaki, C.B. and Bogaert, P. 2016. Legacy soil maps as a covariate in digital soil mapping: A case study from Northern Iran. *Geoderma*. 279, pp.141-148.
42. Parastatidis, D.; Mitraka, Z.; Chrysoulakis, N.; Abrams, M. 2017. Online global land surface temperature estimation from Landsat. *Remote Sens*., 9, 1208.
43. Schoeneberger, P.J. Wysocki, D.A. Benham, E.C. Soil Survey Staff. 2012. Field book for describing and sampling soils. 3nd Version. Natural Resources Conservation Service. *National Soil Survey Center*. Lincoln, NE.
44. Scudiero, E.; Skaggs, T.H.; Corwin, D.L. 2017. Simplifying field-scale assessment of spatiotemporal changes of soil salinity. Sci. Total Environ. 587,pp. 273–281.
45. Scull, P. Franklin, J. and Chadwick, O.A. 2005. The application of classification of tree analysis to soil type prediction in a desert landscape. *Eco. Model.* 181,pp. 1-15.
46. Shi, H.; Hellwich, O.; Luo, G.; Chen, C.; He, H.; Ochege, F.U.; Van de Voorde, T.; Kurban, A.; De Maeyer, P. A. 2021. global meta-analysis of soil

salinity prediction integrating satellite remote sensing, soil sampling, and machine learning. IEEE Trans. *Geosci. Remote Sens*., 60, 4505815.

47. Sreenivas, K. Dadhwal, V.K. Kumar, S. Harsha, G.S. Mitran, T. Sujatha, G. and Ravisankar, T. 2016. Digital mapping of soil organic and inorganic carbon status in India. *Geoderma*. 269, pp.160-173.
48. Tian, A.; Fu, C.; Yau, H.-T.; Su, X.-Y.; Xiong, H. 2019. A new methodology of soil salinization degree classification by probability neural network model based on centroid of fractional lorenz chaos self-synchronization error dynamics. IEEE Trans. *Geosci. Remote Sens*., 58,pp. 799–810.
49. Triki Fourati, H.; Bouaziz, M.; Benzina, M.; Bouaziz, S. 2017. Detection of terrain indices related to soil salinity and mapping salt-affected soils using remote sensing and geostatistical techniques. *Environ. Monit. Assess*. 189, 177.
50. Valavi, R. Elith, J. José, J. Lahoz, M. Gurutzeta, G. 2018. Block CV: an R package for generating spatially or environmentally separated folds for k-fold cross-validation of species distribution models.Biorxiv.
51. Wang, H.; Jia, G. 2012. Satellite-based monitoring of decadal soil salinization and climate effects in a semi-arid region of China. *Adv. Atmos. Sci*. 29,pp. 1089–1099.
52. Wang, Q.; Li, P.; Chen, X. 2012. Retrieval of soil salt content from an integrated approach of combining inversed reflectance model and regressions: An experimental study. IEEE Trans. *Geosci. Remote Sens*. 50,pp. 3950–3957.
53. Wang, Z.; Zhang, F.; Zhang, X.; Chan, N.W.; Ariken, M.; Zhou, X.; Wang, Y. 2021. Regional suitability prediction of soil salinization based on remote-sensing derivatives and optimal spectral index. *Sci. Total Environ*. 775, 145807.
54. Wu, D.; Jia, K.; Zhang, X.; Zhang, J.; Abd El-Hamid, H.T. 2021. Remote sensing inversion for simulation of soil salinization based on hyperspectral data and ground analysis in Yinchuan, China. *Nat. Resour. Res*. 30, pp. 4641–4656.
55. Xiong, J.; Thenkabail, P.S.; Tilton, J.C.; Gumma, M.K.; Teluguntla, P.; Oliphant, A.; Congalton, R.G.; Yadav, K.; Gorelick, N. 2017. Nominal 30-m cropland extent map of continental Africa by integrating pixel-based and object-based algorithms using Sentinel-2 and Landsat-8 data on Google Earth Engine. *Remote Sens.*, 9, 1065.
56. Zhang, Q.; Li, L.; Sun, R.; Zhu, D.; Zhang, C.; Chen, Q. 2020. Retrieval of the soil salinity from Sentinel-1 Dual-Polarized SAR data based on deep neural network regression. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 19, 4006905.
57. Zhang, Z.; Fan, Y.; Zhang, A.; Jiao, Z. 2022. Baseline-Based Soil Salinity Index (BSSI): A Novel Remote Sensing Monitoring Method of Soil Salinization. IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens., 16,pp. 202–214.
58. Zinck, J.K. 1989. Physiography and soil. Lecture notes for K6 course. Soil Division. *ITC. Enschede, The Netherlands*. 156 p.
59. Zolfaghari, A. A. Tirgar Soltani, M. T. Dyck, M. and Weldeyohannes, A. 2013. Comparison of K-nearest neighbor and artificial neural network methods for predicting cation exchange capacity of soil. 50th anniversary Alberta soil science workshop. *Book of Abstracts*. p. 48.

پژوهش‌های خاک / الف / جلد ۳۸ / شماره۲ تابستان/ ۱۶۵/۱۴۰۳-۱۸۰
https://doi.org/10.22092/IJSR.2024.365604.743

# نقش قارچ میکوریز گونه *Funneliformis mosseae* در جذب, انتقال و الگوی تجمع زیستی کادمیوم و مس در گیاه پسته

نرگس روحانی*

استادیارگروه زیست شناسی. دانشگاه پیام نور. تهران.ایرانN_rohani@pnu.ac.ir

« مقاله پژوهشی»

دریافت: ۱۴۰۳/۲/۱۱ و پذیرش:۱۴۰۳/۸/۱

## چکیده

**سمیت فلزات به دلیل ماندگاری، عدم تجزیه پذیری زیستی و نیز تجمع زیستی آنها در اندام های گیاهان و جانوران زنده یک مسئله زیست محیطی مهم محسوب می شود. یکی از روش‌های قابل استفاده برای کاهش اثرات مخرب ناشی از فلزات سنگین به ویژه مس و کادمیوم، در اندام گیاهان و جانوران زنده، استفاده از قارچ‌های میکوریز می باشد. این پژوهش برای تعیین اثر قارچ میکوریز *Funneliformis mosseae* بر رشد و میزان جذب و انتقال کادمیوم و مس, در گیاه پسته رقم احمد آقایی در پاسخ به افزایش غلظت مس و کادمیوم خاک انجام گرفت. آزمایش مذکور به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه سطح مس (غلظت‌های ۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی گرم در لیتر نیترات مس) وچهار سطح کادمیوم (غلظت‌های ۰، ۲۰۰ و ۶۰۰ و ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر نیترات کادمیوم) در دو وضعیت تلقیح شده با قارچ میکوریز*F. mosseae* و بدون مایه تلقیح میکوریزی اجرا شد. در همه گیاهان شاهد و تیمار شده با کادمیوم و مس، طول و وزن خشک ریشه و ساقه گیاهان میکوریزی از گیاهان غیرمیکوریزی بیشتر بود. بر اساس نتایج میزان کادمیوم و مس انتقال یافته از ریشه به بخش هوایی (فاکتور انتقال) در گیاهان به طور معنی داری پایین تر از گیاهان غیرمیکوریزی بود. نتایج نشان داد که فاکتور تجمع زیستی کادمیوم و مس در گیاهان تلقیح شده با قارچ میکوریزی به طور معنی داری پایین تر از گیاهان غیر میکوریزی بوده است. بنابراین با توجه به نتایج همزیستی با قارچ *F. mosseae* باعث تثبیت و تجمع بیشتر کادمیوم و مس در ریشه گردیده است.**

**واژه های کلیدی**: گیاه پالایی، فاکتور انتقال، فلز سنگین،همزیستی

*-آدرس ایمیل نویسنده مسئول: N_rohani@pnu.ac.ir

CC BY

**مقدمه**

به دلیل کمبود منابع آبی در آینده می بایست از آب های صنعتی یا فاضلاب های شهری برای آبیاری باغات استفاده نمود که دارای برخی عناصر سنگین از جمله کادمیوم و مس هستند. کادمیوم یکی از فلزات سنگین دو ظرفیتی است که در طبیعت بیشتر در سنگ های معدنی همراه با روی یافت می شود. این عنصر از طریق فعالیت های معدن کاوی، تمایز مواد اولیه خاک، آبکاری فلزات، استفاده از سوخت های فسیلی، کود های فسفاته و حشره کش ها در کشاورزی و از طریق فاضلاب های شهری و صنعتی وارد خاک می شود (FAO, UNEP, 2020; Kirkham, 2006). تاکنون نشان داده شده که کادمیوم موجب بسیاری از تغییرات مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی، بیوشیمایی و ساختاری درگیاهان مثل مهار رشد و جوانه زنی، کاهش جذب عناصر غذایی، زرد شدن برگ و نکروزه شدن آن ها، تغییر ساختار سلول به ویژه کلروپلاست و تسریع پیری می شود (Benavides et al,2005;Mishra,2009). مس یکی از اجزای تشکیل دهنده پروتئین کلروپلاست یعنی پلاستوسیانین است. این عنصر همچنین بخشی از زنجیره انتقال الکترون را تشکیل می دهد که دو سیستم فتوشیمیایی فتوسنتز را به هم مرتبط می سازد. قارچهای میکوریز به لحاظ توانایی گیاه در جذب مواد غذایی، حفظ فعالیت آنزیم ها(Colla,2008) و افزایش غلظت کلروفیل(Rabie,2005) خطرات ناشی از تنش ها را کاهش داده و باعث افزایش تحمل گیاهان در برابر تنش های زیستی و غیرزیستی می شوند. تلقیح گیاهان با قارچ های میکوریز آربوسکولار باعث مقاومت به تنش های ناشی از خشکی، شوری، حمله پاتوژن ها و فلزات سنگین می شود (Ouziad,2005).سازوکارهایی که قارچ میکوریز آربوسکولار برای کاهش تنش فلزات سنگین برای گیاهان به کار می برد شامل کلات شدن و غیر پویایی فلزات سنگین در میسیلیوم های خارجی، بهبود تغذیه معدنی به ویژه فسفر تغییر pH ریزوسفر و غیره می باشد( Joner et al., 2000;Christie et al., 2004;Guerrero,2005). سازوکارهای دیگر تحمل فلزات سنگین ممکن است شامل رقیق شدگی از طریق افزایش رشد ساقه یا ریشه، اتصال به گرانولهای پلی فسفات و ذخیره آن ها در داخل پلاستید ها و دیگر اندامک های غشا دار باشد (Harahap et al., 2018). علاوه بر این، قارچ میکوریز آربوسکولار جذب فلزات توسط گیاهان را از خاک و انتقال آن به ریشه و اندام هوایی تحت تاثیر قرار می دهد که به نوع فلز، گیاه و گونه قارچ بستگی دارد.

ویژگی های اختصاصی گیاهان مناسب برای استفاده در تثبیت گیاهی آلاینده های فلزی عبارتند از: ۱- متحمل بودن نسبت به غلظت های بالای فلزات سنگین ۲- تولید مقادیر زیاد زیتوده ریشه ای به منظور جذب درونی یا سطحی یون های فلزی و جلوگیری از تحرک آنها و ۳- ناتوانی گیاه در انتقال مقادیر زیاد آلاینده های فلزی از ریشه به اندام هوایی. در تکنیک تثبیت گیاهی، گیاهان مستقر در مکان های آلوده به جای خارج نمودن آلاینده ها از خاک، به واسطه جذب فلزات در درون یا بر سطح ریشه های خود و یا رسوب در ناحیه ی ریزوسفر، آنها را تثبیت و غیر متحرک می سازند. تثبیت گیاهی در خاک های با بافت مناسب به منظور کاهش خطر آبشویی و حرکت آلاینده های فلزی به سمت آبهای زیرزمینی و همچنین جلوگیری از جابه جایی آنها توسط باد به مناطق مجاور غیر آلوده کارآیی دارد(Berti and cunninggham,2000 ).از طرف دیگر قابلیت جذب زیستی آلاینده های فلزی به منظور ورود به زنجیره های غذایی نیز کاهش خواهد یافت(Lasat ,2002).

پسته اهلی (*Pistacia vera*) متعلق به تیره *Anacardiaceae* و یکی از محصولات مهم تجاری در مناطق خشک و نیمه خشک است که با نام ایران در آمیخته

و تولید آن درکشور ایران سابقه تاریخی و طولانی دارد (Radmehr, 2010; Bagheri *et al*., 2012). پسته گیاهی است که سالهاست در مناطقی از ایران کشت و پرورش داده می شود. یکی از این مناطق استان کرمان شهرستان رفسنجان است که در نزدیکی معادن مس سرچشمه قرار دارد. بنابراین با توجه به اهمیت اقتصادی قابل توجه پسته و اثرات سوء ناشی از سمیت مس در مناطق پسته کاری به خصوص در اطراف معادن مس (Shamsadin et al., 2015) و نیز استفاده از کودهای فسفات توسط پسته کاران در این مناطق که حاوی مقادیر بالایی از کادمیوم هستند (Jazaeri et al., 2015). راهکارهای افزایش مقاومت و تحمل گیاه پسته در این مناطق باید مورد توجه بیشتری قرار گیرد که با توجه به همین مسئله و اینکه در گیاه پسته در این زمینه, پژوهشهای زیادی صورت نگرفته, این تحقیق با هدف بررسی نقش قارچ *Funneliformis mosseae* در رشد و میزان جذب و انتقال کادمیوم و مس در گیاه پسته انجام گرفت که در همین راستا گیاه پسته با قارچ میکوریز *F. mosseae* تلقیح شده و با گیاهان فاقد همزیستی میکوریزی تحت شرایط سمیت ناشی از کادمیوم و مس مقایسه شدند.

## مواد و روش ها

برای انجام این تحقیق از گیاه پسته رقم احمدآقایی استفاده شد. این تحقیق در قالب طرح کاملا تصادفی به صورت فاکتوریل با ۳ تکرار انجام گردید. بذر های مذکور از پژوهشکده پسته در رفسنجان (موسسه تحقیقات پسته کشور) تهیه شد. برای جوانه زنی، بذرهای سالم پسته انتخاب و با آب مقطر چندین بار شسته شدند و سپس به مدت ۱۰ دقیقه در محلول آب ژاول ۵٪ ضدعفونی گردیده و مجدد با آب مقطر شسته شدند. بعد از آن به مدت ۴۸ ساعت در آب مقطر در تاریکی قرار داده شدند. در طی این مدت نیز آب روی بذرها تعویض شد. سپس بذور در لای پارچه ای نخی مرطوب درمحیطی گرم (دمای ۱±۲۸ درجه سانتیگراد) و تاریک قرار داده شدند تا جوانه بزنند. جوانه زنی بذرها پس از حدود یک هفته صورت گرفت. سپس بذرهای جوانه زده به گلدان منتقل شدند. در هر گلدان (با ارتفاع ۱۲ سانتیمتر و قطر دهانه ۸ سانتیمتر) ۲ عدد بذر پسته جوانه زده کاشته شد. گلدانها شامل پرلیت استریل بوده (Lee et al.,2005) که نیمی از تعداد کل گلدانها با قارچ میکوریز *Funneliformis mosseae* آغشته شدند. ماده تلقیح موردنظر از کلینیک گیاه‌پزشکی ارگانیک شهرستان اسد آباد همدان تهیه شد که فقط حاوی گونهٔ *F. mosseae*میکوریزایی به همراه ریشه، هیف و خاک بود. تعداد اسپور در هر گرم از مایه تلقیح شمارش شد که حدود ۱۰۰ عدد اسپور در هر گرم از مایه تلقیح محاسبه گردید. در زمان کاشت ۲۵ گرم مایه تلقیح قارچی در کنار هر بذر جوانه زده گذاشته و سپس روی آن با پرلیت پوشانده شد. گلدانها در گلخانه، تحت شرایط نوری ۱۶ ساعت نور و ۸ ساعت تاریکی، با شدت نور ۸۵۰ لوکس ، رطوبت ۷۵ درصد و دمای ۲±۲۵ درجه سانتیگراد در روز و دمای ۲±۱۷ درجه سانتیگراد در شب نگهداری شدند. در ابتدا با توجه به نیاز آبی آبیاری با آب مقطر صورت گرفت. زمانی که تعداد برگها به ۳ تا ۴ عدد رسید، آبیاری با محلول غذایی هوگلند (pH : ۵/۸±۰/۱) آغاز شد. هر ۲ روز یکبار آبیاری با ۲۰ میلی لیتر محلول هوگلند ( 0.5 mM $KNO_3$, 400 µM $Ca(NO_3)_2$, 10 µM Fe-EDTA, 0.2 mM $MgSO_4$,, 10 µM $H_3BO_3$, 2 µM $MnCl_2$, 2 µM ($ZnSO_4$, 0.1 µM $Na_2MoO_4$ and 0.2 µM $CuSO_4$ صورت گرفت. در این فاصله برای جلوگیری از خشک شدن گلدانها از آب مقطر برای آبیاری و جلوگیری از تجمع فلزات استفاده شد. هم زمان با شروع آبیاری با محلول غذایی هوگلند, افزودن مس و کادمیوم به صورت جداگانه و همزمان آغاز شد. اعمال تنش با ۲۰ میلی لیتر محلول نیترات مس در غلظت های ۰، ۳۰۰ و۶۰۰ میلی گرم در لیتر و ۱۰

میلی لیتر محلول نیترات کادمیوم در غلظت های ۰، ۲۰۰و۶۰۰ و ۱۰۰۰میلی گرم در لیترصورت گرفت( Sara et al., 2008; Yurekli and Kucukbay, 2003).

گیاهان بعد از گذشت ۲ ماه از زمان کاشت جمع آوری شدند. به این ترتیب که ریشه و بخش هوایی گیاهان در گروههای تیماری مختلف جدا و صفات مورفولوژیکی شامل طول بخش هوایی و زمینی و نیز وزن خشک آنها اندازه‌گیری گردید. در همین زمان مقداری از ریشه های ظریف انتهایی آنها برای بررسی میزان آغشتگی ریشه ها به قارچ میکوریز جدا و در محلول FAA (فرمالین،اسید استیک، الکل اتیلیک) نگهداری شدند. سایر نمونه ها نیز بعد از اندازه‌گیری صفات مورفولوژیکی، در نیتروژن مایع قرار گرفتند و در فریزر ۲۰- درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند.

## صفات مورفولوژیکی

طول ساقه و ریشه و وزن خشک اندام هوایی و ریشه گیاهان در گروه های تیماری مختلف اندازه‌گیری گردید. برای اندازه گیری وزن خشک، نمونه‌ها در فویل آلومینیومی پیچیده شده و به مدت ۷۲ ساعت درآون در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شد. سپس وزن خشک نمونه ها بر حسب گرم بر گیاه گزارش گردید.

## تعیین درصد کولونیزاسیون ریشه

رنگ آمیزی ریشه‌های واجد میکوریز آربوسکولار و اندازه گیری میزان کولونیزاسیون ریشه ها به این میکوریز با روش راجاپاکز و همکاران (۱۹۹۲) و با استفاده از رنگ فوشین اسیدی انجام شد. پس از شفاف سازی و رنگ آمیزی ریشه‌ها، قطعات ریشه رنگ آمیزی شده در ظروف پتری که در زیر آن کاغذ میلیمتری قرار داده شده بود، به طور تصادفی پخش شدند. پس از آن در زیر میکروسکوپ تشریحی (استریوسکوپ) نقاط برخورد ریشه با خطوط اصلی کاغذ و نیز تعداد نقاط برخوردی که واجد قارچ بودند شمارش شد و نسبت این نقاط دارای قارچ به کل نقاط برخورد بر حسب در صد محاسبه گردید (Giovannetti and Moss,1980).

درصد کولونیزاسیون ریشه = (تعداد کل قطعات کولونیزه شده(واجد اندامهای قارچی) تقسیم بر تعداد کل قطعات مورد مطالعه) ضربدر ۱۰۰

## تعیین غلظت کادمیوم ومس

مقدار ۰/۱گرم ازماده خشک گیاه (ریشه واندام هوایی به صورت جداگانه) درنسبت مساوی اسیدنیتریک واسیدپرکلریک‌غلیظ قرارگرفت وبه خوبی هضم گردید. سپس‌محلول اسیدی حرارت داده شد تا بخارات آن‌خارج شود. درمرحله بعد حجم محلول باآب‌مقطر به ۵۰ میلی‌لیتر رسانده شد وبه‌کمک کاغذصافی صاف‌گردید. سپس میزان کادمیوم و مس‌محلول به‌کمک دستگاه جذب اتمی بر حسب میلی گرم بر گرم وزن خشک اندازه‌گیری شد.

## محاسبه ی فاکتور انتقال

جهت ارزیابی گیاهان به عنوان گیاه جذبی، فاکتور انتقال محاسبه شد.فاکتور انتقال نشان دهنده ی توانایی گیاه برای حرکت و جابجایی فلزات از ریشه به اندام هوایی می باشد و از رابطه زیر به دست می آید ( Jing et al.,2014).

غلظت فلز در ریشه / غلظت فلز در اندام هوایی = فاکتور انتقال

## محاسبه ی فاکتور تجمع زیستی

فاکتور تجمع زیستی برای محاسبه ی میزان تجمع فلزات سمی در گیاهان به واسطه ی مقایسه غلظت در محیط

کشت خارجی (مثل خاک یا محیط هوگلند) استفاده می شود (Jing et al.,2014) .

غلظت فلز در محلول هوگلندباشد/ غلظت فلز در اندام هوایی =فاکتور تجمع زیستی

## تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل‌های آماری طبق آزمایش فاکتوریل با طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار صورت گرفت و داده‌ها با استفاده از نرم افزار SPSS(نسخه ۱۶) تحت آنالیز واریانس قرار گرفته و اختلاف میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه ای دانکن در سطح اطمینان ٪۹۵ مقایسه شدند.

## نتایج

### تاثیر کادمیوم و مس بر مورفولوژی گیاه پسته در شرایط میکوریزی و غیر میکوریزی

آنالیز آماری داده ها بر طبق جداول تجزیه واریانس ( جدول۱، ۲) نشان از معنی دار بودن اثرات متقابل مس و میکوریز و نیز کادمیوم و میکوریز بر صفات مورفولوژیک در سطح احتمال ۱ درصد می باشد (p≤۰/۰۱).

افزایش غلظت کادمیوم طول ساقه پسته را به طور معنی‌داری کاهش داد که این کاهش در پسته های میکوریزی به طور معنی داری کمتر بود ( نمودار۱) . همچنین در این تحقیق با افزایش غلظت مس طول ساقه پسته های میکوریزی و غیر میکوریزی به طور معنی‌داری کاهش یافت که البته طول ساقه پسته های تلقیح شده به طور معنی داری بیشتر از گیاهان غیر میکوریزی بود ( نمودار ۱).

افزایش غلظت کادمیوم طول ریشه پسته را به طور معنی داری کاهش داد که این کاهش در پسته های میکوریزی به طور معنی داری کمتر بود (نمودار ۲) و طبق نتایج در غیاب و حضور کادمیوم گیاهان تلقیح شده طول ریشه بیشتری داشتند. طبق نتایج این تحقیق با افزایش غلظت مس طول ریشه پسته های میکوریزی و غیر میکوریزی به طور معنی داری کاهش یافت که در پسته های تلقیح شده با به طور معنی داری رشد ریشه بیشتری بود (نمودار۲ ).

**جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) درصد آغشتگی، شاخص های رشدی، میزان کادمیوم ریشه و ساقه**

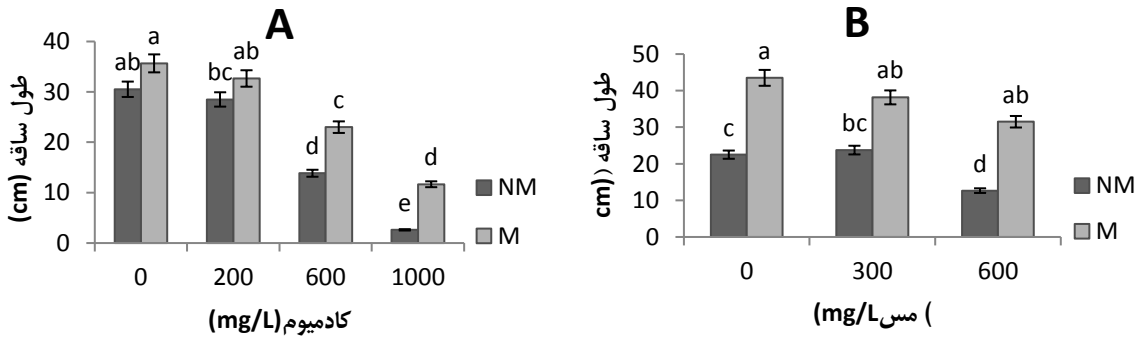
| منابع تغییر | درجه آزادی | درصد آغشتگی | طول ریشه | طول ساقه | وزن خشک ریشه | وزن خشک ساقه | میزان کادمیوم ریشه | میزان کادمیوم ساقه |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **میکوریز** | ۱ | ۹۳۵۵/۸۸۶** | ۶۱۳/۰۸۳** | ۵۷۴/۶۰۵** | ۶/۶۷۳** | ۲/۶۷۶** | ۰/۳۰۹** | ۱/۰۸۱** |
| کادمیوم | ۳ | ۲۱۶/۳۱۱** | ۸۳۶/۲۰۱** | ۷۱۲/۸۶۵** | ۷/۵۹۶** | ۱/۹۴۳** | ۰/۱۶۱** | ۲/۱۹۴** |
| **میکوریز*کادمیوم** | ۳ | ۲۰۹/۲۳۲** | ۰/۰۸۷* | ۵/۰۵۵** | ۰/۴۷۷** | ۰/۶۵۲** | ۰/۰۰۱ns | ۰/۴۷۶ns |
| **خطا** | ۱۴ | ۱/۶۵۱ | ۰/۰۴۳ | ۰/۰۲۹ | ۰/۶۷۰ | ۰/۷۸۵ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۱ |

**، * و ns به ترتیب معنی داردر سطح احتمال ۱ ، ۵ درصد وغیر معنی دار.

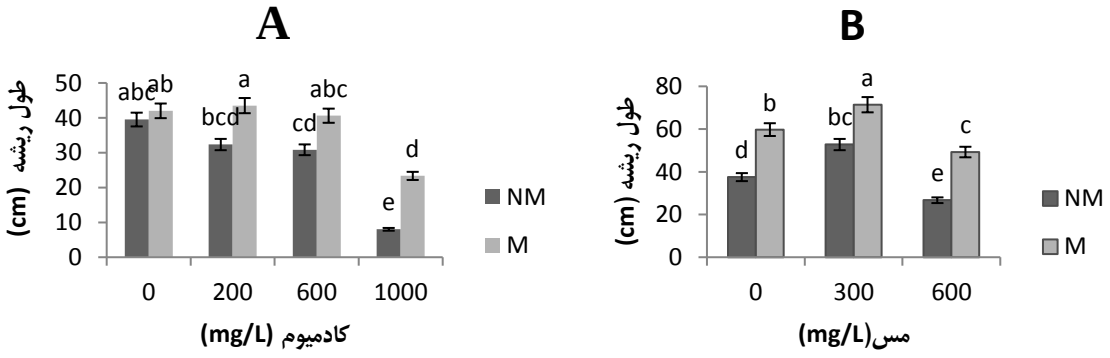
**جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) درصد آغشتگی، شاخص های رشدی، میزان مس ریشه و ساقه**

| منابع تغییر | درجه آزادی | درصد آغشتگی | طول ریشه | طول ساقه | وزن خشک ریشه | وزن خشک ساقه | میزان مس ریشه | میزان مس ساقه |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **میکوریز** | ۱ | ۱۰۴۱۶/۰۵۶** | ۸۹۷/۸۹۱** | ۱۵۴۹/۳۸۹** | ۰/۰۰۵** | ۰/۰۱۴** | ۰/۱۷۹ns | ۰/۷۴۵** |
| مس | ۲ | ۲۰۴/۲۲۲** | ۳۹۰/۸۵۲** | ۱۵۴/۱۶۷* | ۰/۰۰۲** | ۰/۰۰۸** | ۱۰/۴۹۵** | ۱/۴۸۸** |
| **میکوریز*مس** | ۲ | ۲۰۴/۲۲۲** | ۲/۹۸۹** | ۷۰/۳۸۹** | ۰/۰۰۱** | ۰/۰۰ns | ۰/۱۱۰ns | ۰/۲۱۳ns |
| **خطا** | ۱۲ | ۱/۵۰۰ | ۷/۴۵۱ | ۳۹/۰۸۳ | ۷/۱۸۲ | ۰/۰۰۱ | ۰/۵۰۰ | ۰/۰۶۳ |

**، * و ns به ترتیب معنی داردر سطح احتمال ۱ ، ۵ درصد وغیر معنی دار.




**نمودار ۱- تأثیر غلظتهای متفاوت کادمیوم (A) و مس(B) بر طول ساقه گیاه پسته میکوریزی ( M ) و غیر میکوریزی(NM)**

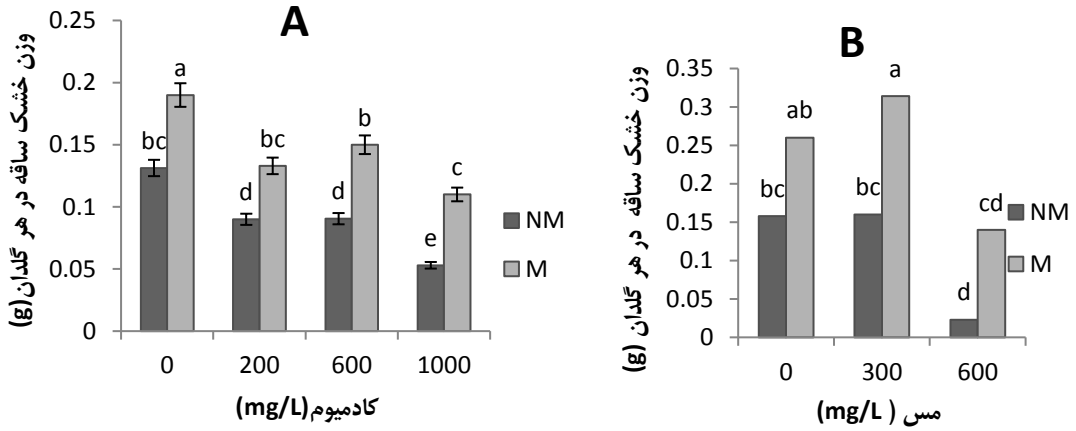



**نمودار۲- تأثیر غلظتهای متفاوت کادمیوم (A) و مس (B) بر طول ریشه گیاه پسته میکوریزی ( M ) و غیر میکوریزی(NM)**

افزایش غلظت کادمیوم وزن خشک ساقه پسته را به طور معنی‌داری کاهش داد که این کاهش در پسته های میکوریزی به طور معنی داری کمتر بود (نمودار۳ ) و طبق نتایج در غیاب و حضور کادمیوم گیاهان تلقیح شده وزن خشک ساقه بیشتری داشتند.

با افزایش غلظت مس وزن خشک ساقه پسته های غیر میکوریزی کاهش یافت که البته بین غلظت ۰ و ۳۰۰ میلی گرم بر لیتر تفاوت معنی دار نبود ولی در غلظت ۶۰۰ میلی گرم بر لیتر در پسته های غیر میکوریزی تفاوت معنی دار

بود. پسته های تلقیح شده در غلظت ۳۰۰ میلی گرم بر لیتر به طور معنی داری رشد بیشتری داشتند در حالی که در غلظت های ۰ و ۶۰۰ میلی گرم بر لیتر این تفاوت معنی دار نبود (نمودار ۳ ).

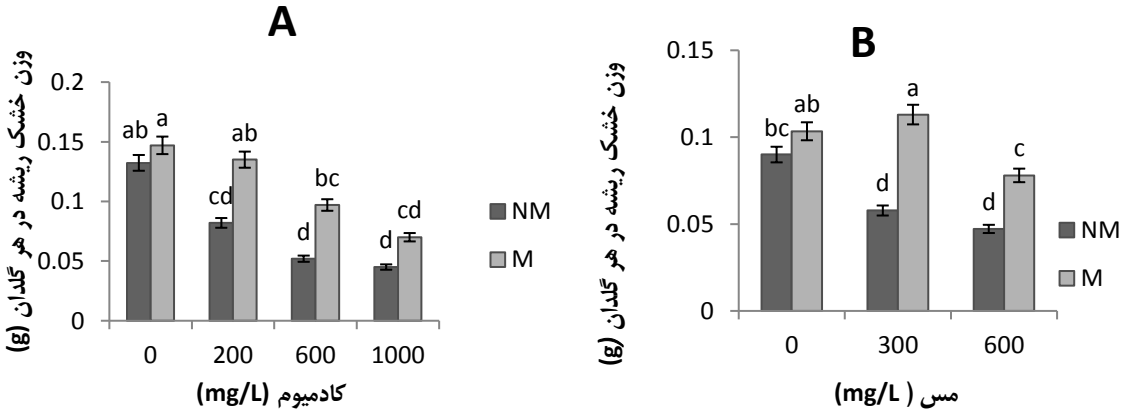



**نمودار ۳- تأثیر غلظتهای متفاوت کادمیوم (A) و مس(B) بر وزن خشک ساقه گیاه پسته میکوریزی ( M ) و غیر میکوریزی(NM)**

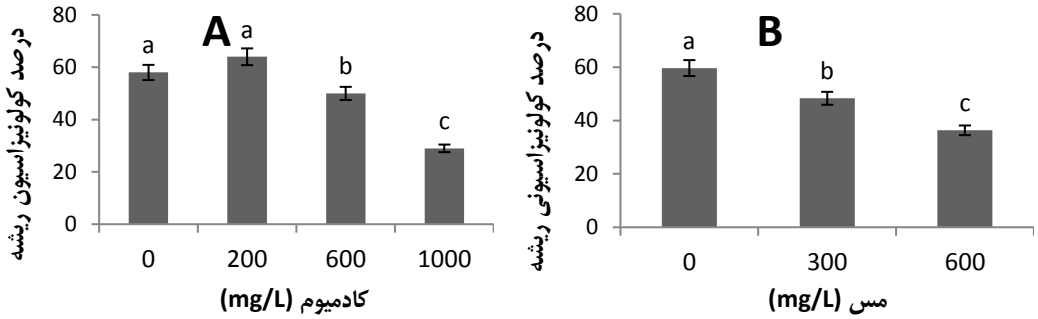
افزایش غلظت کادمیوم وزن خشک ریشه پسته را به طور معنی‌داری کاهش داد که این کاهش در پسته های میکوریزی به طور معنی داری کمتر بود (نمودار ۴ ) و طبق نتایج در غیاب و حضور کادمیوم گیاهان تلقیح شده وزن خشک ریشه بیشتری داشتند. با افزایش غلظت مس وزن خشک ریشه پسته های غیر میکوریزی کاهش معنی داری پیدا کرد. پسته های تلقیح شده نسبت به پسته های غیر میکوریزی به غیر از حالت شاهد به طور معنی داری وزن خشک بیشتری داشتند و بین پسته های میکوریزی نیز در دو غلظت ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی گرم بر لیتر مس تفاوت معنی دار بود (نمودار ۴ ).

## درصد کولونیزاسیون

نتایج این مطالعه نشان داد درصد کولونیزاسیونریشه نهال های پسته با افزایش غلظت کادمیوم و مس در خاک به طور معنی داری کاهش پیدا کرد (نمودار۵).




**نمودار ۴-تأثیر غلظتهای متفاوت کادمیوم (A) و مس(B) بر وزن خشک ریشه گیاه پسته میکوریزی ( M ) و غیر میکوریزی(NM)**

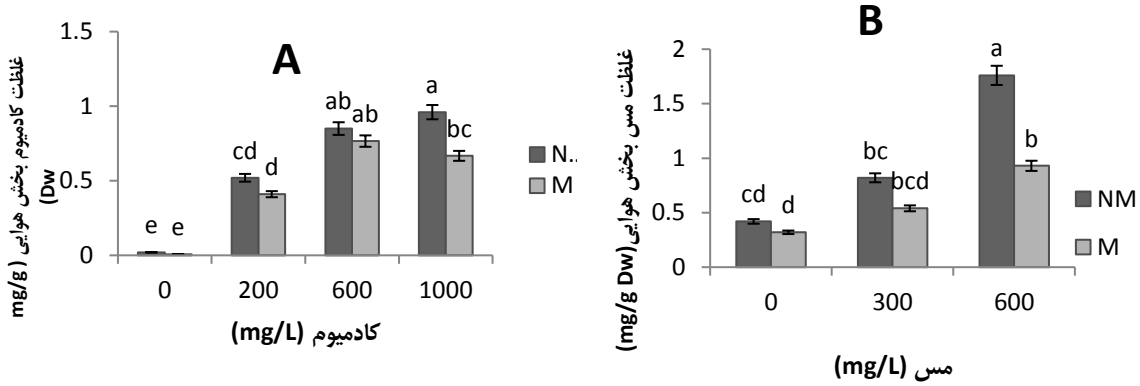



**نمودار ۵- تأثیر غلظتهای متفاوت کادمیوم(A) و مس(B) بر درصدکولونیزاسیون ریشه گیاه پسته میکوریزی**

## میزان کادمیوم و مس بخش هوایی در دو وضعیت میکوریزی و غیر میکوریزی

نتایج نشان داد که با افزایش غلظت کادمیوم،غلظت کادمیوم در بخش هوایی افزایش می یابد اما غلظت کادمیوم در بخش هوایی گیاهان میکوریزی نسبت به غیر میکوریزی در غلظت mg/L ۱۰۰۰ پایین تر بود(نمودار ۶ ) و در غلظت های پایین (۲۰۰ و ۶۰۰ میلی گرم بر لیتر)اختلاف معنی داری بین گیاهان میکوریزی و غیر میکوریزی در این مورد مشاهده نشد.

با افزایش غلظت مس میزان مس در بخش هوایی نیز افزایش پیدا کرد ولی غلظت مس در بخش هوایی گیاهان میکوریزی نسبت به غیر میکوریزی در غلظت ۶۰۰mg/L پایین تر بود(نمودار۶).

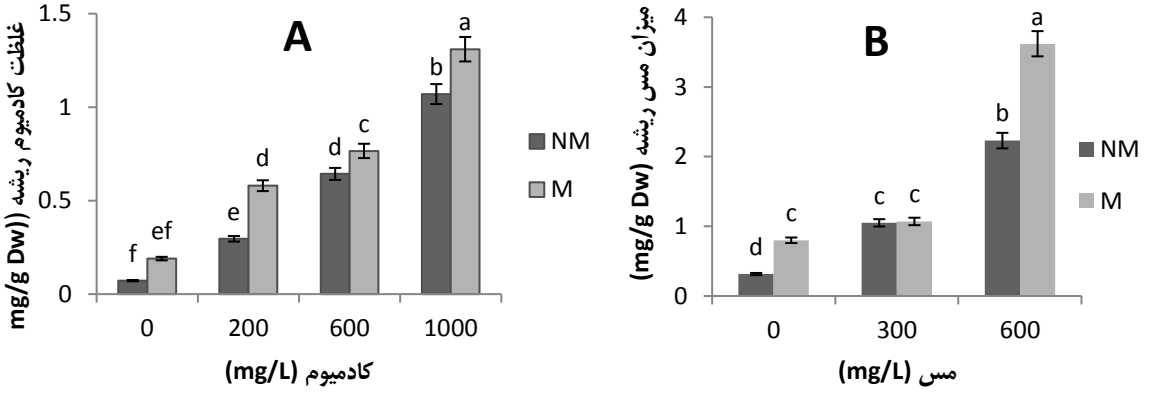



**نمودار۶- تأثیر غلظتهای متفاوت کادمیوم (A) و مس (B) بر میزان کادمیوم و مس بخش هوایی گیاه پسته میکوریزی ( M ) و غیر میکوریزی(NM)[1]**

## میزان کادمیوم و مس ریشه در دو وضعیت میکوریزی و غیر میکوریزی

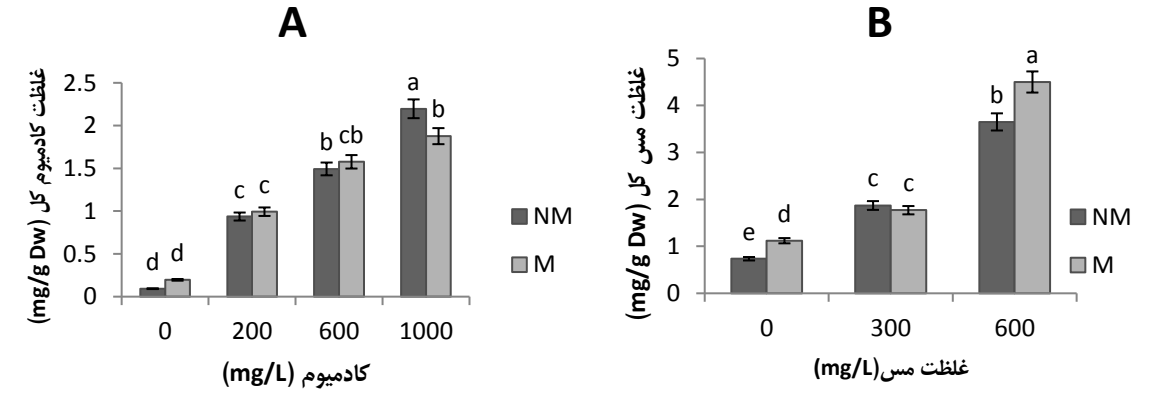
نتایج نشان داد که غلظت کادمیوم در ریشه گیاهان با افزایش غلظت کادمیوم به طور معنی داری افزایش می یابد و در گیاهان میکوریزی نسبت به غیر میکوریزی نیز مقدار کادمیوم به طور معنی داری بالاتر بود(نمودار ۷ ).

طبق نتایج غلظت مس در ریشه گیاهان میکوریزی نسبت به غیر میکوریزی تفاوت معنی داری نشان نداد (نمودار ۷ ) ولی به طور کلی غلظت مس ریشه با افزایش غلظت مس افزایش نشان داد. در وضعیت میکوریزی و غیر میکوریزی به طور جداگانه در غلظت ۶۰۰ میلی گرم بر لیتر مس تفاوت معنی دار بود.




**نمودار ۷- تأثیر غلظتهای متفاوت کادمیوم (A) و مس (B) بر میزان کادمیوم و مس ریشه گیاه پسته میکوریزی ( M ) و غیر میکوریزی(NM)**

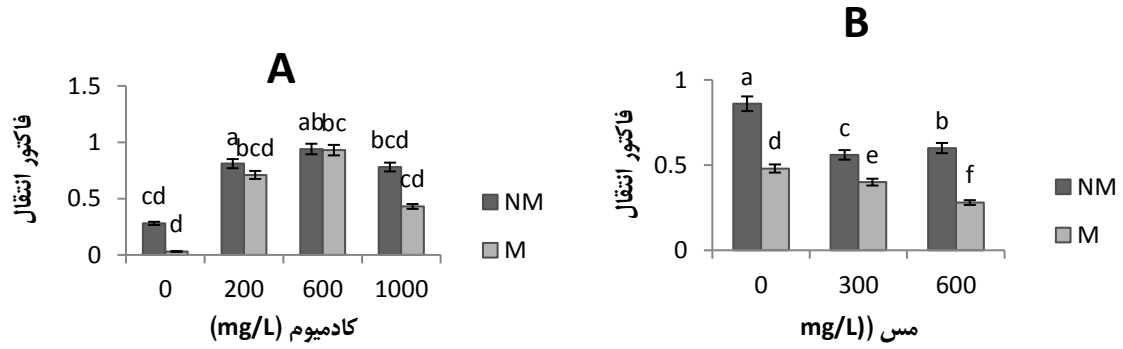
نتایج نشان داد که غلظت کادمیوم کل گیاهان با افزایش غلظت کادمیوم به طور معنی داری افزایش یافت و در گیاهان میکوریزی نسبت به غیر میکوریزی به استثنای غلظت mg/L ۱۰۰۰ در بقیه غلظت ها مقدار کمی بیشتر بود(نمودار ۸). طبق نتایج غلظت مس کل با افزایش غلظت مس افزایش نشان داد و درغلظت mg/L . و۶۰۰ در گیاهان میکوریزی نسبت به غیر میکوریزی به طور معنی داری بیشتر بود (نمودار ۸).




**نمودار ۸- تأثیر غلظتهای متفاوت کادمیوم (A) و مس (B) بر میزان کادمیوم و مس کل گیاه پسته میکوریزی ( M ) و غیر میکوریزی(NM)**

## فاکتورانتقال

فاکتورانتقال (TF) محاسبه شده نشان میدهدکه با افزایش غلظت کادمیم درخاک فاکتور انتقال تا غلظت ۶۰۰ میلی گرم بر گرم درگیاهان میکوریزی و غیر میکوریزی افزایش نشان می دهد اما در غلظت ۱۰۰۰ میلی گرم بر گرم فاکتور انتقال کاهش می یابد( نمودار۹) که البته در گیاهان میکوریزی فاکتور انتقال پایین تراز گیاهان غیرمیکوریزی بود اگر چه این تفاوت معنی دار نبود. فاکتورانتقال(TF) محاسبه شده دادکه با افزایش غلظت مس درخاک فاکتور انتقال کاهش می یابد(نمودار۹) و در گیاهان میکوریزی نیز هم در شرایط تنش و هم در شرایط غیر تنش فاکتور انتقال پایین تر از گیاهان غیرمیکوریزی بود.

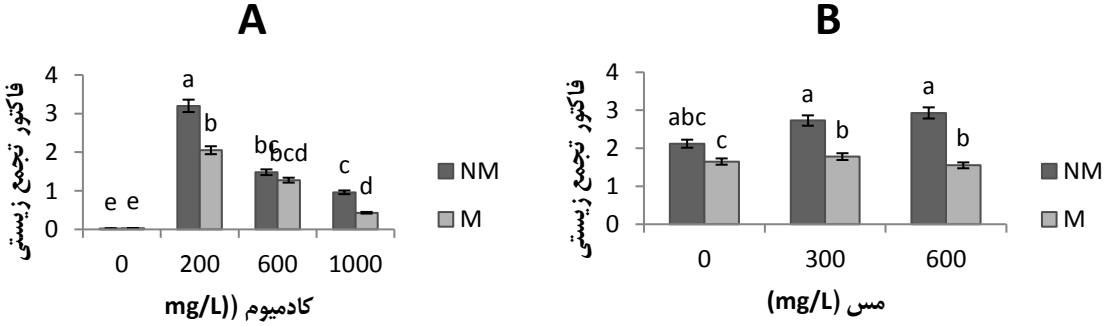



**نمودار ۹- تأثیر غلظتهای متفاوت کادمیوم (A) و مس(B) بر میزان فاکتور انتقال گیاه پسته میکوریزی ( M ) و غیر میکوریزی(NM)**

## فاکتور تجمع زیستی

بر اساس مطالعه انجام گرفته مشخص شد که در تیمار با کادمیوم ومس مقدار فاکتور تجمع زیستی در گیاهان میکوریزی پایین تر از گیاهان غیر میکوریزی بوده است که البته در غلظت ۲۰۰ و ۱۰۰۰ میلی گرم بر گرم کادمیوم این اختلاف معنی دار بود ولی در در غلظت ۶۰۰ میلی گرم بر گرم اختلاف معنی داری مشاهده نشد (نمودار ۸ ). در تیمار با مس فقط در وضعیت شاهد اختلاف معنی دار نبود (نمودار ۱۰ ).

در این مطالعه محاسبه فاکتور تجمع زیستی در مورد کادمیوم نشان داد که در تنش کادمیوم در مقایسه با گیاه شاهد این پارامتر افزایش می یابد و این مقدار با افزایش شدت تنش رابطه معکوس دارد. همزیستی گیاه پسته با قارچ نیز توانست فاکتور تجمع زیستی را در این گیاه کاهش دهد (نمودار ۱۰).در تنش مس فاکتور تجمع زیستی افزایش غیر معنی دار داشت و همزیستی میکوریزی در شرایط تنش توانست این پارامتر را کاهش دهد(نمودار ۸ ).




**نمودار ۱۰- تأثیر غلظتهای متفاوت کادمیوم (A) و مس(B) بر میزان فاکتور تجمع زیستی در گیاه پسته میکوریزی ( M ) و غیر میکوریزی(NM)**

**بحث**

همانطور که نتایج نشان می دهد سمیت کادمیوم و مس طول ریشه و ساقه و نیز وزن خشک ریشه و ساقه پسته را به طور معنی‌داری کاهش داد. طبق نتایج (Zang et al.,2018) نیز آلودگی خاک با کادمیوم درریشه های گیاه *Lolium perenne* منجر به کاهش زیتوده بخش زیرزمینی شد.کاهش پارامترهای رشد در گیاه پسته همزمان با افزایش کادمیوم و مس در خاک می تواند مربوط به ممانعت از میتوز، کاهش تشکیل دهنده های دیواره،آسیب به دستگاه گلژی و تغییر در متابولیسم پلی ساکاریدها باشد (Sai kachout et al.,2010). فلزات سنگین با کاهش شدید فتوسنتز و انتقال تولیدات فتوسنتزی،تقسیم سلولی و رشد گیاه را به شدت کاهش می دهند(Dalla et al., 2005).

کاهش وزن خشک ریشه در غلظتهای بالای فلزات مس و کادمیوم در گیاهان غیرمیکوریزی بارزتر از گیاهان میکوریزی بود. این شواهد نشان میدهد سمیت یا به طور مستقیم به خاطر تنش اکسیداتیو سلولی ناشی از جذب فلز(Cho andseo,2005 ) یا غیرمستقیم به دلیل عدم تعادل عناصرغذایی در اثر افزایش غلظت در ریزوسفر روی می دهد (Kabata-pendias, 2011). درصد کولونیزاسیون ریشه نهال های پسته با افزایش غلظت کادمیوم و مس در محیط کشت به طور معنی داری کاهش پیدا کرد.

نتایج این آزمایش با نتایج سایر محققان مطابقت داشت.(Andrade et al., 2004; Yamin et al., 2023). ثابت ماندن کولونیزاسیون در غلظتهای پایین مس و کادمیوم نشان دهنده افزایش ترجیح گیاه جهت برقراری همزیستی در شرایط تنش می باشد (Audet and Charest, 2009). از سوی دیگر کاهش کولونیزاسیون ریشه در بالاترین غلظت مس و کادمیوم احتمالاً ناشی از افزایش سمیت فلزات است. در این پژوهش غلظت کادمیوم کل در غلظت های پایین کادمیوم (غلظتmg/L ۲۰۰ و mg/L ۶۰۰ ) در گیاهان میکوریزی نسبت به غیر میکوریزی افزایش محسوسی نداشتولی در غلظت های بالای کادمیوم (غلظتmg/L ۱۰۰۰) در گیاهان میکوریزی نسبت به غیر میکوریزی کاهش معنی دارینشان داد که تایید کننده این است که قارچهای میکوریزی توانسته اند گیاه را در برابر سمیت کادمیوم با غیر متحرک کردن این فلز در ریشه و خاک محافظت کنند. در پژوهشی روی گیاه برنج و *Solanum nigrum* نیز تلقیح با قارچ میکوریزآربوسکولار تحت شرایط آلودگی با کادمیوم زیتوده گیاه را افزایش می دهد و سیستم آنتی اکسیدان گیاه را فعال می کند و از طرفی سطح کادمیوم وارد شده به دانه را کاهش می دهد (Yang et al.,2021). در پژوهش دیگری روی غلات محتوای کادمیوم محصول با تلقیح گیاه با قارچ میکوریز آربوسکولار همزمان با افزودن کادمیوم کاهش پیدا کرد اما جذب کادمیوم افزایش نشان داد که نشان می دهد قارچ میکوریز آربوسکولارنقش مثبتی در افزایش رشد گیاه دارد. در واقع می توان نتیجه گرفت که قارچ میکوریز زیتوده گیاه را سریع تر از میزان جذب کادمیوم افزایش می دهد که باعث می شود که علی رغم افزایش جذب کادمیوم میزان کادمیوم گیاه کاهش نشان بدهد (Yamin et al., 2023). بنابراین پیشنهاد می شود که گیاهان میکوریزی با زیتوده بیشتر می توانند در گیاه پالایی[1] در خاکهای آلوده و با کادمیوم بالا مورد استفاده قرار گیرند. فاکتورانتقال محاسبه شده نشان می دهدکه با افزایش غلظت کادمیوم و مس درخاک فاکتور انتقال درگیاهان میکوریزی و غیر میکوریزی کاهش نشان می دهد که البته در گیاهان میکوریزی فاکتور انتقال به طور معنی داری پایین تر از گیاهان غیرمیکوریزی بود. در پژوهش های انجام شده توسط سایر محققین نیز بر جذب فلزات سنگین توسط گیاه شبدر سفید این فاکتور در گیاهان میکوریزی ۱۰ تا ۲۰ برابر کم تر از گیاهان غیر میکوریزی گزارش شده است (Madani etal.,2013).

مکانیسم های مقاومتی گیاهان به فلزات سنگین شامل دو

[1] Phytoremediation

استراتژی ممانعت از جذب و یا تجمع فلز در اندام گیاه است (zou and song, 2004). به طوری که در استراتژی تجمع ($TF \geq 1$) گیاه مقادیر بالاتری ازفلز را به اندام هوایی منتقل می کند و تنها مقادیر ناچیزی در ریشه ذخیره می شود و در استراتژی ممانعت از جذب ($TF \leq 1$) مقادیر بالاتری از فلز در ریشه ذخیره می شود (Sun et al,2009). نتایج نشان داد که در پسته در در هر دو وضعیت میکوریزی و غیر میکوریزی TF $\leq 1$است. صرف نظر از تأثیر ساختارهای قارچی درکمپلکس کردن فلز وکاهش انتقال به بخش هوایی عوامل دیگری میتوانند دلیلی برای کاهش انتقال فلز باشند. یکی از دلایلی که میتوان برای کاهش انتقال کادمیوم ومس به بخش هوایی گیاهان بیان کرد این است که با توجه به اینکه انتقال فلز به اندام هوایی ازطریق آوندهای چوبی صورت می گیرد و عامل انتقال دراین آوندها، شیب هیدروستاتیک و شیب پتانسیل آب است، بنابراین با کاهش رشد گیاهان دراثر افزایش غلظت کادمیوم ومس، میزان تبخیر و تعرق کاهش ومیزان انتقال دراین آوندها نیز کاهش می یابد(Kholdebarin and Islamzadeh, 2002). باتوجه به اثر بازدارنده فلزسنگین بر شدت فتوسنتز، تولید کربوهیدراتها کاهش می یابد و به تبع آن میزان انتقال این مواد درریشه ها نیز کم می شود. ازطرف دیگر کربوهیدراتها سوبسترای اصلی برای تنفس هستند، بنابراین باکاهش میزان فتوسنتز تأمین کربوهیدراتها برای ریشه هاو حتی قارچ همزیست محدود شده و تنفس آنهاکاهش می یابد (Amanifar et al., 2010).

فاکتور تجمع زیستی (BCF) نشان دهنده ی غلظت آلاینده ها در گیاهان در مقایسه با غلظت های زیست محیطی است(Wang et al., 2013). بر اساس مطالعه انجام گرفته مشخص شد که مقدار فاکتور تجمع زیستی در گیاهان میکوریزی پایین تر از گیاهان غیر میکوریزی بوده است که البته در غلظت ۲۰۰ و ۱۰۰۰ میلی گرم بر گرم کادمیوم این اختلاف معنی دار بود ولی در در غلظت ۶۰۰ میلی گرم بر گرم اختلاف معنی داری مشاهده نشد.

نتایج حاصل از این آزمایش نشان داد که در پسته $BCF \geq 1$است که نتایج حاصل با نتایج انجام شده درگیاه بادام زمینی مطابقت دارد (Nareshkumar et al, 2015). درگیاهان اسفناج وشاهی نیز درمحیط کشت آلوده به کادمیوم وکروم نیز نتایج مشابهی گزارش شد(Jahanbakhshi et al., 2015).

BCF وTCF هردوشاخص مهمی برای ارزیابی پتانسیل گیاهان برای پالایش فلزات سنگین موجود درمحیط به شمار می رود (Ghanaya, 2005; Yoon et al, 2006; Panday, 2013; Panday et al., 2014). در گیاهان تحت تنش فلزات سنگین اگر $TF \leq 1$ و $BCF \geq 1$ باشد گیاه می تواند یک مورد مناسب و بالقوه یه عنوان تثبیت کننده فلز[1] باشد (Yoon et al, 2006). از آنجا که در گیاه پسته در مورد کادمیوم و مس $TF \leq 1$ و $BCF \geq 1$ بود. بنابراین پسته می تواند یک تثبیت کننده کادمیوم و مس باشد. تلقیح گیاه پسته با قارچ *F. mosseae* نیز باعث شد که قدرت تثبیت کنندگی کادمیوم و مس ریشه افزایش یابد که با نتایج سایر پژوهشها در گیاه انگور باغی مطابقت دارد (Gustavo et al., 2023).

تجمع عنصر درگیاه بستگی به ویژگیهای گیاه،گونه و اندام گیاهی واثرات متقابل فلزات سنگین وسمیت آنها دارد و از طرفی همزیستی با قارچ میکوریز نیز تجمع فلز را متاثر می سازد که تاثیر قارچ می تواند از طریق مکانیسم های درگیر در آزادسازی گلومالین باشد که قادرند با فلزات سنگین به ویژه مس کمپلکس تشکیل دهند به علاوه ساختار های قارچی مثل هیف ها, اسپورها و وزیکولهای قارچ قادرند سبب نگه داشتن فلز اضافی شوند که باعث کاهش انتقال فلز به گیاه می شود.

[1] Phytostabilizer

## نتیجه گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که، تلقیح گیاه پسته با *Funneliformis mosseae* باعث افزایش رشد گیاه پسته در حضور کادمیوم و مس در مقایسه با وضعیت غیر میکوریزی می‌شود. *F. mosseae* نقش موثری در غیر متحرک سازی کادمیوم و مس در ریشه‌ها نشان داد. بنابراین بر اساس نتایج این پژوهش قارچ میکوریز*F. mosseae* می تواند به عنوان یک عامل بیولوژیکی موثر و کمک کننده در گیاه پالایی کادمیوم و مس در گیاه پسته باشد که باعث کاهش اثرات سمی کادمیوم و مس در این گیاه می گردد. بنابراین در باغات پسته می توان از قارچ میکوریز *F. mosseae* به عنوان یک کود بیولوژیک موثر هم از نظر تغذیه بهتر گیاه و هم کاهش اثرات سمیت فلزات مس و کادمیوم در خاکهای آلوده به این فلزات, استفاده نمود. همچنین *F. mosseae* می تواند به عنوان یک عامل تثبیت کننده موثر مس و کادمیوم در ریشه, هم از نظر اطمینان از سالم بودن محصول (میوه پسته) به دلیل انتقال کمتر این فلزات به بخش های هوایی گیاه و هم از نظر پالایش محیط زیست, در محیط های آلوده به این فلزات مفید واقع شود که البته نیاز هست تحقیقاتی به شکل مزرعه ای نیز در منطقه صورت گیرد تا برآورد درستی از حل مسئله به دست آید. این تحقیق یک گام کوچک در جهت شروع بررسی این مشکل در منطقه خواهد بود.

## فهرست منابع


1. Amanifar, S., Aliasgharzad, N., Najafi, N., Oustan, Sh., Bolandnazar, S. (2010). Effect of Arbuscular Mycorrhizal fungi on lead phytoremediation by sorghum (Sorghum bicolor L.). Journal of Soil and Water. 22:155-170.

2. Andrade, S.A.L., Abreu, C.A., de Abreu, M.F., Silveira, A.P.D. (2004). Influence of lead addition on arbuscular mycorrhiza and Rhizobium symbioses under soybean plants. Applied Soil Ecology. 26:123-131.

3. Audet, P., Charest, C. (2009). Contribution of arbuscular mycorrhizal symbiosis to in vitro root metal uptake: from trace to toxic metal conditions. Journal of Botany. 87(10):913–921.

4. Bagheri, V., Shamshiri, M., Shirani, H. and Roosta, H. (2012) Nutrient uptake and distribution in mycorrhizal pistachio seedlings under drought stress. Journal of Agriculture Science Biochemistry 14:1591-1604.

5. Benavides, M. P., Gallego, S. M., Tomaro, M.L. (2005). Cadmium Toxicity in Plants. Braz. Journal of Plant Physiology. 17: 21-34.

6. Berti, W.R., Cunningham, S.D. 2000. Phytostabilization of metals. In: Raskin, I., Ensley, B.D. (Eds.), Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean-up the environment. Wiley. New York, pp. 71–88.

7. Cho, U.H., Seo, N.H.(2005). Oxidative stress in Arabidopsis thaliana exposed to cadmium is due to hydrogen peroxide accumulation. Plant Science. 168(1): 113-120.

8. Colla, G., Rouphael, Y., Cardarelli, M., Tullio, M., Rivera, C.M., Rea, E. (2008). Alleviation of salt stress by arbuscular mycorrhizal in zucchini plants grown at low and high phosphorus concentration. Biology and Fertility of Soils. 44:501–509.
9. Dalla vecchia,f., La Rocca,N.,Moro,I. (2005). Morphogenetic, ultrastructural and physiological damages suffered by submerged leaves of Elodea Canadensis exposed to cadmium. Plant Science.168(2):329-338.
10. FAO, UNEP, (2020). Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). http://www.fao.org/faostat/en/?#data/.
11. Ghnaya, T.(2005). Cadmium effects on growth and mineral nutrition of two halophytes: Sesuvium portulacastrum and Mesembryanthemum crystallinum. Journal of Plant Physioloy. 162: 1133–1140.
12. Giovannetti, M. and Mosse, B. (1980). An evaluation of techniques for measuring vesicular–arbuscular infection in roots. New Phytologist. 84:489–500.
13. Guerrero M.M. Ros C.Martínez M.A. Martínez M.C. BarcelóN.L acasaA.(2005).Biofumigación con solarización. Un método estable de desinfección de suelos de invernadero. Acta Portuguesa de Hort.7(3):111-115.
14. Gustavo Brunetto , Anderson C. R. Marques , Edicarla Trentin , Paula B. Sete , Cláudio R. F. S. Soares , Paulo A. A. Ferreira , George W. B. de Melo , Jovani Zalamena , Lincon O. S. da Silva, Carina Marchezan , Isley C. B. da Silva , João P. J. dos Santos , Leticia Morsch, .(2023). Arbuscular mycorrhizal fungi inoculation as strategy to mitigate copper toxicity in young field-grown Vines.J viticulture Enol. 38(1): 60-66.
15. Harahap,L.H.,Hanafiah,A.S. and Guchi,H.( 2018).The effectiveness of mycorrhizal application on the absorption of N and P nutrients from rubber plants on drought stressed land that has been given organic matter. Agroecotechnology.6(1): 167-173.
16. Jahanbakhshi, Sh., Rezaei, M.R., Sayyari-Zaman, M.H. (2015). Comparison effect of phytoremediation in cadmium and chromium contaminated soil in Spinacia oleracea and Lepidium sativum. Journal of Water and Soil . 18(70): 1-11.
17. Jazaeri , M.S. Akhgar A.R .and Sarcheshmehpour M. (2015).Comparison of the native phosphate rock and imported triple superphosphate treated with sulfur and Thiobacillus in transferring lead and Cadmium into Pistachio seedling . Journal of Soil Management and Sustainable Production. 5(3):25-44.
18. Jing, Y., Cui, H., Li, T., Zhao, Z. (2014). Heavy metal accumulation characteristics of Nepalese alder (Alnus nepalensis) growing in a lead-zinc spoil heap, Yunnan, south-western China. iForest– Biogeosci Forestry. 7: 204–208.
19. Joner, E.J., Briones, R., Leyval, C. (2000). Metal-binding capacity of arbuscular mycorrhizal mycelium. Plant and Soil. 226: 227–234.
20. Jones, J., Benton. ( 2001). Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis CRC press –LLC . ISBN 0-8493-0206-4 (alk paper).

21. Kabata- Pendias, A., Pendias, H. (2001). Trace Elements in Soils and Plants. 3rd ed. CRC Press Inc., Baton Rouge, USA.

22. Kholdbryn, B., Islamzadeh, T. (2002). Mineral nutrition of higher plants. In two volumes Shiraz University Press. (In Persian).

23. Kirkham, M.B. (2006). Cadmium in plants on polluted soils: Effects of soil factors, hyperaccumulation, and amendments. Geoderma, 137, 19–32.

24. Lasat, M.M.(2002). Phytoextraction of toxic metals – A review of biological mechanisms. Joournalof Environmental Qualityl. 31: 109–120.

25. Lee, Y.J., George, E. (2005). Development of nutrient film technique culture system for arbuscular mycorrhizal plants. Hortscience. 40(2:378-380.

26. Madani, A., Lakzian, A., Haghnia, Gh., Khorasani, R. 2013. Contribution of External Hyphae of Arbuscular Mycorrhizal Fungi to Transfer Cadmium, Zinc and Phosphorus to White Clover. J. Sci. Technol. Agric. Natur. Resour. Water and Soil Sciences. 17,63: 37-46.

27. Mishra, S., Srivastava, S., Tripathi, R.D., Govindarajan, R., Kuriakose, S.V., Prasad, M.N.V. (2006). Phytochelatin synthesis and response of antioxidants during cadmium stress in Bacopa monnieri L. Plant Physiology and Biochemistry. 44:25–37.

28. Nareshkumar, A., Nagamallaiah, G.V., Pandurangaiah, M., Kiranmai, K., Amaranathareddy, V., Lokesh, U., Venkatesh, B. and Sudhakar, C. ( 2015). Pb-Stress induced oxidative stress caused alterations in antioxidant efficacy in two groundnut (Arachis hypogaea L.) cultivars. Agricaltural Sciences.6:1283-1297.

29. Ouziad, F., Hildebrandt, U., Schmelzer, E., Bothe, H. (2005). Differential gene expressions in arbuscular mycorrhizal-colonized tomato grown under heavy metal stress. J Plant Physiol. 162:634–649.

30. Pandey, V.C. (2013). Suitability of Ricinus communis L. cultivation for phytoremediation of fly ash disposal sites. Ecol Eng. 57: 336–341.

31. Pandey, V.C., Singh, N., Singh, R.P., Singh, D.P. (2014). Rhizoremediation potential of spontaneously grown Typha latifolia on fly ash basins: study from the field. Ecological Engineering. 71:722–727.

32. Rabie, G.H. (2005). Contribution of AM fungus to red kidney and wheat plants tolerance grown in heavy metal-polluted soil. African Journal of Biotechnology. 4(4): 332-345.

33. Radmehr, A. (2010) The results of a sample survey design horticultural products in 1387. Ministry of Agriculture, Tehran. (in Farsi).

34. Rajapakse, S., Ghton, C. R. E., Miller, Jr. J. (1992). Methods for studying vesicular –arbuscular mycorrhizal root colonization and related root physical properties . Methods in microbiology . volum 24 . ISBN 0-12-521524-X.

35. Sai Kachout, S., Ben Mansoura, A. J.C., Leclerc, J. C., Mechergui, R., Rejeb, M. N., Ouerghi, Z. (2010). Effect of heavy metals on antioxidant activities of Atriplex

hortensis and A. rosea . Electronic Journal of Environmental Agricultural and Food Chemistry 9: 444-457.

36. Sara, A.L. de Andrade., Adriana, P.D. da Silveira., (2008) . Mycorrhiza influence on maize development under Cd stress and P supply. Braz Journal of plant physioloy. 20(1):39-50.

37. Shamsaldin, H., Jalali, V. and Jafari, A. (2015). Evaluation of environmental pollution indices around the Sarcheshmeh copper factory.Journal of Agricultural Engineering. 38(2): 37-53.

38. Sun, F.F., da Wen, Z., Kuang, Y.W., Li, J., Zhang, J.G. (2009). Concentrations of sulphur and heavy metals in needles and rooting soils of masson's pine (Pinus massoniana L.) trees growing along an urban–rural gradient in Guangzhou, China. Environ Monit Assess.154:263–274.

39. Wang, T.X., Yin, Z.H., Zhang, W., Peng, T., Kang, W.Y. (2013).Chemical constituents from Psoralea corylifolia and their antioxidant alpha-glucosidase inhibitory and antimicrobial activities. China journal of Chinese Materia Medica. 38(14):2328-2333.

40. yang, X., Qin, J., Li, J., Lai, Z., Li, H. ( 2021). Upland rice intercropping with Solanum nigrum inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi reduces grain Cd while promoting phytoremediation of Cd-contaminated soil. J. Hazard. Mater. 406, 124325 https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124325.

41. Yamin Gao a,b , Tingting An b,c , Qiqiang Kuang a,b , Yujie Wu a,b , Shuo Liu a,b , Liyan Liang b,c , Min Yu d,e , Andrew Macrae f,g , Yinglong Chen. (2023). The role of arbuscular mycorrhizal fungi in the alleviation of cadmium stress in cereals: A multilevel meta-analysis. Science of Total Environment.902:1-14

42. Yoon, J. (2006). Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. Science of Total Environment. 368: 456–464.

43. Yurekli, F., Kucukbay, Z. (2003). Synthesis of phytochelatins in Helianthus annuus is enhanced by cadmium nitrate. . Acta Botanica Croatica. 62(1): 21–25.

44. Zhang, H., Xu, N., Li, X., Long, J., Sui, X., Wu, Y., Li, J., Wang, J., Zhong, H., Sun, G.Y. (2018). Arbuscular Mycorrhizal Fungi (Glomus mosseae) Improves Growth, Photosynthesis and Protects Photosystem II in Leaves of Lolium perenne L. in Cadmium Contaminated Soil. Frontiers in Plant Science, 9,1156. doi: 10.3389/fpls.2018.01156

45. Zhou, Q.X., Song, Y.F. (2004). Principles and method of treating contaminated soil remediation, Science Press, Beijing, pp.489.

پژوهش‌های خاک / الف / جلد ۳۸ / شماره۲ تابستان/ ۱۴۰۳/ ۱۹۵-۱۸۱
https://doi.org/10.22092/IJSR.2024.364062.731

# اثر سیلیسیم و اسید هیومیک بر برخی پاسخ‌های فیزیولوژیک فلفل دلمه‌ای (*capsicum annuum L.*) در سطوح مختلف شوری

محمد کاظم دهقانی*، رضا قاسمی، صدیقه صفرزاده و محمد اعتمادی

دانشجوی دکتری، بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز. رایانامه: mk.dehghani@hafez.shirazu.ac.ir
استاد، بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز. رایانامه: ghasemif@shirazu.ac.ir
استادیار، بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز. رایانامه: safarzadeh@shirazu.ac.ir
استادیار، بخش علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز. رایانامه: m.etemadi@shirazu.ac.ir

« مقاله پژوهشی»
دریافت: ۱۴۰۲/۸/۲۷ و پذیرش:۱۴۰۳/۶/۱۹

## چکیده

**تنش شوری، از مهم‌ترین عوامل محدود کننده‌ی رشد و توسعه‌ی گیاهان در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود. برای کشت گیاه در این مناطق می‌توان با بهره‌گیری از روش‌هایی از کاهش عملکرد جلوگیری کرد. یکی از این روش‌ها، استفاده از محرک‌های رشد می‌باشد. هدف از انجام این پژوهش، بررسی تاثیر مصرف اسید هیومیک و سیلیسیم بر رشد گیاه فلفل دلمه‌ای در سطوح مختلف شوری بود. این آزمایش در گلخانه تحقیقاتی دانشکده‌ی‌کشاورزی دانشگاه شیراز در سال ۱۳۹۸ به انجام رسید. تیمار با آب شور در ۴ سطح ۰، ۱/۷، ۳/۴ و ۵/۱ دسی زیمنس برمتردر طی دوره رشد به گلدان‌ها افزوده شد و از تیمارهای اسید هیومیک و سیلیسیم و کاربرد همزمان این دو برای کاهش اثرات شوری استفاده شد. اسید هیومیک در دو نوبت، هر نوبت ۰/۵ گرم در کیلوگرم خاک به صورت خاکی اضافه گردید، سیلیسیم نیز به صورت محلول‌پاشی از منبع سیلیکات پتاسیم با غلظت ۱٪ اعمال شد. نتایج به‌دست آمده از این مطالعه نشان داد که سطح ۵/۱ دسی زیمنس برمترشوری سبب کاهش ۶۳٪ وزن خشک گیاه شد و درمیان تیمارهای بهبود دهنده، تنها اسید هیومیک توانست با ۵۵٪ افزایش در زیست توده گیاه اثر معنی داری ایجاد کند. شوری همچنین سبب افزایش غلظت سدیم، کلسیم و منیزیم درگیاه شد، به این صورت که سطح شوری ۵/۱ دسی زیمنس برمترنسبت به شاهد، به ترتیب سبب افزایش ۷۵۰٪، ۱۷۶٪ و ۱۰۱٪ غلظت این عناصر شد. نتایج به دست آمده در خصوص تیمارهای بهبود دهنده نشان داد که کاربرد همزمان اسید هیومیک و سیلیسیم سبب افزایش ۷۶٪ غلظت سدیم در گیاه و تیمار هیومیک سبب کاهش ۲۸٪ غلظت کلسیم ریشه شد. با توجه به نتایج این تحقیق، تیمار اسید هیومیک بیشتر از تیمار سیلیسیم و نیز کاربرد همزمان اسید هیومیک و سیلیسیم توانست اثرهای شوری را بیشترکاهش دهد.**

**واژه های کلیدی**: آب شور، تنش شوری، محرک‌های رشد ، مواد آلی

*- آدرس ایمیل نویسنده مسئول:mk.dehghani@hafez.shirazu.ac.ir

CC BY

**مقدمه**

تنش‌های غیر زیستی مانند شوری، گرما و سرما به همراه تنش‌های زیستی بر رشد و عملکرد گیاهان اثر می گذارند (Winfield *et al.*, 2010) و هر ساله منجر به ضررهای زیادی می‌شوند که در این میان شوری خاک مخرب‌تر از دیگر تنش‌ها می‌باشد (Shahbaz and Ashraf, 2013). شوری به عنوان غلظت بیش از حد نمک های محلول در خاک تعریف می‌شود. شوری بر مورفولوژی و عملکرد گیاه تأثیر منفی داشته و باعث کاهش زیست توده گیاه می‌شود (Parvaiz, 2014). در همه مناطق آب و هوایی، شور شدن خاک رخ می‌دهد اما به طور عمده در مناطق خشک و نیمه خشک رواج بیشتری دارد. این مشکل ممکن است در اثر فرآیندهای طبیعی مانند هوازدگی سنگ‌ها و یا در اثر فعالیت‌های انسانی مانند استفاده از آب شور و کودهای معدنی باشد (Yiu *et al.*, 2012). کمبود آب با کیفیت در مناطق خشک و نیمه خشک باعث تشویق کشاورزان برای مصرف آب شور برای آبیاری گیاهان می شود (Oron *et al.*, 1999).

فلفل گونه حساس به شوری محسوب می‌شود (Maas and Hoffman, 1977) اما به طور کل فلفل‌ها بسته به نوع رقم و ژنوتیپ نسبت به شوری پاسخ‌های متفاوتی نشان می‌دهند (Lycoskoufis *et al.*, 2005; Aktas *et al.*, 2006). کاهش رشد فلفل در اثر تنش شوری می‌تواند ناشی از اختلال در چندین فرآیند فیزیولوژیکی باشد مانند کمبود آب حاصل از افزایش پتانسیل اسمزی، سمیت یون ناشی از غلظت بالای سدیم و کلر، عدم تعادل یونی ناشی از تجمع یون سدیم در بافت گیاه، اختلال در جذب عناصر غذایی به ویژه نیتروژن و دخا لت در فتوسنتز (del Amor and Cuadra-Crespo, 2012) باشد. با توجه به حساسیت گیاه فلفل به شوری خاک می‌توان از روش‌هایی که گیاه را قادر به تحمل تنش شوری می‌کند استفاده کرد (Ashraf and Foolad, 2007; Ashraf *et al.*, 2008). یکی از انواع این روش‌ها استفاده از موادی است که رشد گیاهان را بهبود می‌بخشد که شامل ترکیبات آلی نظیر اسید هیومیک، عصاره جلبک دریایی و مواد معدنی مانند سیلیسیم می‌باشد.

مواد آلی خاک عمدتا از اسید هیومیک و فولویک اسید تشکیل شده که به آن‌ها مواد هیومیکی گفته می‌شود، که به طور معمول از ترکیبات نیتروژن‌دار حاوی اسید آمینه تجزیه شده ساخته می‌شوند (Andriesse, 1988). مواد هیومیکی ۶۵ تا ۷۰ درصد ماده آلی خاک را تشکیل می‌دهند. اسید هیومیک رشد و عملکرد بسیاری از گیاهان را افزایش می دهد (Zandonadi *et al.*, 2007) همچنین ممکن است رشد شاخه را تحریک کرده و مقاومت در برابر تنش محیطی را بهبود بخشد، اگرچه مکانیسم فیزیولوژیکی آن به خوبی مشخص نیست (Delfine *et al.*, 2005). اسید هیومیک اثر مفیدی در جذب عناصر غذایی به‌ویژه برای انتقال و دسترس بودن عناصر کم‌مصرف در گیاهان اهمیت ویژه‌ای دارد (Böhme and Lua, 1996). گزارش شده است که تغذیه با اسید هیومیک باعث ایجاد دفاع آنزیمی گیاهان در برابر تنش شوری شد (Cimrin *et al.*, 2010) . سایر اثرات بالقوه اسید هیومیک شامل: افزایش رشد ریشه، تغییر جذب مواد معدنی و کاهش آسیب غشا است که می تواند اثرات مضر تنش شوری را کاهش داده و تحمل به نمک را افزیش دهد (Canellas *et al.*, 2015). علاوه بر این، اعتقاد بر این است که کاربرد اسید هیومیک باعث بهبود اجزای عملکرد گیاهان رشد یافته تحت تنش شوری می شود (Paksoy *et al.*, 2010).

سیلیسیم (Si) دومین عنصر فراوان موجود در پوسته زمین بوده که در ترکیب با اکسیژن سیلیکات‌ها را تشکیل می‌دهد ۳۱ درصد وزن خاک و ۰/۱ تا ۰/۶ میلی مولار محلول خاک از سیلیسیم تشکیل شده است (Epstein, 1999). اگرچه هنوز سیلیسیم به عنوان یک عنصر ضروری برای گیاهان مطرح نیست با این حال تا حد زیادی در مورد اثرات آن در کاهش تنش‌های مختلف زیستی و غیرزیستی در بسیاری از گونه‌های گیاهی مطالعه صورت گرفته است (Song *et al.*, 2011; Zhu and Gong, 2014). کاربرد سیلیسیم عملکرد گیاهان را از

طریق افزایش راندمان فتوسنتز و افزایش مقاومت به آفت و بیماری بهبود می‌بخشد. اثر سیلیسیم در کاهش تنش‌های مختلف در گیاهان گوناگون از جمله خیار (Dragišić Maksimović *et al.*, 2007) و برنج (Gu *et al.*, 2012) گزارش شده است. شوری منجر به تجمع یون‌های سدیم و کلرید در سیتوزول می‌شود که برای سلول مضر است (Tuteja, 2007). افزایش مقدار سدیم و کلر برهمکنش غیرکووالانسی بین اسیدهای آمینه را مختل می‌کند (Zhu, 2002) و منجر به کاهش غلظت عناصری مانند پتاسیم و کلسیم می‌شود (Wang and Han, 2007). کاربرد سیلیسیم یک رویکرد سازگار با محیط زیست است که نسبت بهینه یون سدیم به یون پتاسیم، تعادل مواد مغذی و تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) را حفظ می‌کند (Almeida *et al.*, 2017). نتایج نشان داد سیلیسیم تحمل به شوری را در گیاهانی مانند ذرت (Rohanipoor *et al.*, 2013)، سورگوم (Yin *et al.*, 2013)، خیار (Zhu *et al.*, 2004)، برنج (Flam-Shepherd *et al.*, 2018) و کلزا (Hashemi *et al.*, 2010) افزایش می‌دهد.

هدف از انجام این مطالعه بررسی اثر محلول‌پاشی سیلیسیم و کاربرد خاکی اسید هیومیک بر واکنش فیزیولوژیکی فلفل دلمه‌ای تحت سطوح مختلف شوری می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال ۱۳۹۸ و در گلخانه‌ی تحقیقاتی دانشکده‌ی کشاورزی دانشگاه شیراز (با مختصات طول جغرافیایی ۲۹ درجه و ۵۰ دقیقه شمالی، عرض جغرافیایی ۵۲ درجه و ۴۶ دقیقه شرقی، و ارتفاع ۱۸۱۰ متر از سطح دریا) انجام شد. خاک مورد استفاده در این پژوهش از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری منطقه باجگاه شیراز نمونه‌برداری شد و پس از آماده سازی خاک ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن تعیین شد. بافت خاک به روش هیدرومتر(Gee and Bauder, 1979)، ماده آلی به روش اکسایش با اسیدکرومیک و سپس تیتر کردن با فروآمونیوم سولفات (Nelson and Sommer, 1996)، pH خاک در گل اشباع با استفاده از pH متر (Thomas, 1996)، قابلیت هدایت الکتریکی به نسبت ۱ به ۵ با دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی، فسفر قابل استفاده با عصاره‌گیر بی‌کربنات سدیم (Watanabe and Olsen,1965)، ظرفیت تبادلی خاک به روش جانشینی با استات‌سدیم (Sumner and Miller, 1996)، عناصر کم‌مصرف کاتیونی با عصاره‌گیری دی تی پی ای (Lindsay and Norvell, 1978) و قرائت با دستگاه جذب اتمی شیمادزو مدل AA-670 اندازه‌گیری شد. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش در جدول ۱ آمده است:

**جدول ۱- ویژگی فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش**

| شن | سیلت | رس | هدایت الکتریکی | اسیدیته | ماده آلی | فسفر | آهن | مس | روی | منگنز |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ٪ | | | dS/m | | % | mg/Kg | | | | |
| 30 | 34 | 36 | 0.13 | 7.4 | 1.1 | 8.8 | 5.16 | 1.4 | 1.88 | 14.84 |

این آزمایش در قالب طرح آزمایشی فاکتوریل بر پایه طرح کاملا تصادفی با سه تکرار انجام شد. تیمارها شامل شوری آب آبیاری در چهار سطح ۰، ۱/۷، ۳/۴ و ۵/۱ ($dSm^{-1}$, $S_3$) ($S_0$, $S_1$, $S_2$) و مواد بهبود دهنده شیمیایی و آلی در چهار سطح شاهد، اسید هیومیک، سیلیسیم و کاربرد همزمان اسید هیومیک و سیلیسیم بودند. در این تحقیق تیمار شوری از طریق آب آبیاری در ده نوبت به فاصله ۵ روز به گیاه افزوده شد. در هر نوبت صفر-۰/۶-۱/۲-۱/۸ گرم سدیم کلرید در نیم لیتر آب مقطر حل کرده و به هر گلدان داده شد. اسید هیومیک در دو نوبت، هر نوبت ۰/۵ گرم در کیلوگرم خاک به صورت خاکی اضافه گردید، سیلیسیم نیز به صورت محلول‌پاشی از منبع سیلیکات پتاسیم با غلظت ۱ درصد اعمال شد، pH اسپری سیلیسیم در حدود ۵ (با اضافه کردن اسید فسفریک یک مولار) تنظیم شد. زمان مصرف

سیلیسیم همزمان با مصرف اسید هیومیک یعنی ۵۰ و ۷۰ روز پس از کاشت بذر بود. برای این که تنها اثر اسپری بر گیاه اثر گذارد، سطح خاک با پلاستیک پوشانده شد.

هرگلدان با ۳ کیلوگرم خاک پرشده و سپس با توجه به آزمون خاک محلول غذایی تهیه و به خاک اضافه شد. در هر گلدان ۴ عدد بذر فلفل دلمه‌ای رقم کالیفورنیا واندر[1] کشت شد و یک هفته بعد تعداد گیاهچه‌ها به ۲ عدد کاهش یافت. پس از گذشت ۱۲ هفته گیاه را از محل طوقه قطع و ریشه نیز با دقت از خاک خارج کرده و به خوبی شستشو تا خاک اضافه از آن جدا شود و سپس نمونه‌ها در آون در دمای ۶۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت خشک گردید و سپس با آسیاب گیاهان خشک شده را آسیاب کرده و پس از آسیاب نیم گرم از نمونه را وزن و در کوره الکتریکی در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس خاکستر و سپس در اسید کلریدریک دو مولار حل شد و از کاغذ صافی عبور داده و به حجم رسانده تا عصاره گیاه بدست آید. غلظت سدیم از عصاره به وسیله دستگاه فلیم فتومتری و غلظت عناصر کلسیم و منیزیم از عصاره گیاه به وسیله دستگاه جذب اتمی خوانده شد (Isaac and Kerber, 1971). تمام داده‌های به دست آمده مورد تجزیه و تحلیل واریانس (GLM) قرار گرفتند. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه دانکن، در سطح معنی داری ۵ درصد و توسط نرم افزار SAS انجام شد.

## نتایج و بحث

### وزن خشک اندام هوایی و ریشه

اثر شوری بر وزن خشک اندام هوایی و ریشه درسطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). با افزودن آب شور، وزن خشک گیاه کاهش یافت. به طوریکه که سطوح $S_2$ و $S_3$ به ترتیب سبب کاهش ۲۴ و ۶۹ درصدی وزن خشک اندام هوایی شدند ( جدول ۳). افزایش شوری سبب کاهش وزن خشک ریشه گردید اما این کاهش تا سطح $S_1$ تفاوت معنی‌دار با شاهد نداشت. با این حال، سطوح $S_2$ و $S_3$ توانستند به ترتیب سبب کاهش ۴۱ و ۷۷ درصدی وزن خشک ریشه شوند (جدول ۴). افزودن مواد بهبود دهنده سبب افزایش وزن خشک اندام هوایی و ریشه شدند اما تنها اسید هیومیک توانست افزایش معنی‌دار نسبت به شاهد ایجاد کند و باعث افزایش ۵۵ درصدی در وزن خشک اندام هوایی و ریشه شد که احتمالا می‌توان به خاطر نقش اسید هیومیک در بهبود شرایط خاک و جذب عناصر باشد (جدول ۳ و ۴).

**جدول ۲- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر اسید هیومیک و سیلیسیم بر برخی خصوصیات فیزیولوژیک گیاه فلفل دلمه‌ای تحت تنش شوری**

| | | میانگین مربعات | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | وزن خشک | | ارتفاع بوته | سدیم | کلسیم | | منیزیم | | |
| منابع تغییرات | درجه آزادی | اندام هوایی | ریشه | | اندام هوایی | ریشه | اندام هوایی | ریشه | اندام هوایی | ریشه |
| شوری | 3 | $7.96^{**}$ | $1.19^{**}$ | $123^{**}$ | $6.09^{**}$ | $0.041^{**}$ | $1492598^{**}$ | $253079^{**}$ | $6638^{**}$ | $6512^{**}$ |
| بهبود دهنده رشد | 3 | $0.444^{ns}$ | $0.147^{ns}$ | $19.6^{ns}$ | $0.101^{ns}$ | $0.002^{ns}$ | $625104^{**}$ | $241855^{**}$ | $635^{ns}$ | $1434^{ns}$ |
| شوری × بهبود دهنده رشد | 9 | $1.39^{ns}$ | $0.079^{ns}$ | $24.2^{ns}$ | $0.185^{ns}$ | $0.001^{ns}$ | $215209^{ns}$ | $111244^{**}$ | $2126^{ns}$ | $1177^{ns}$ |
| خطا | 32 | 1.06 | 0.068 | 19.3 | 0.222 | 0.002 | 112546 | 10034 | 1282 | 711 |

*، ** و ns به ترتیب به مفهوم معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد، ۱ درصد و غیر معنی‌دار می‌باشند.

[1] *California Wonder*

همانطور که از نتایج مشخص است شوری خاک باعث کاهش زیست توده گیاه می‌شود. این امر به دلیل مشکلاتی مانند جذب کم آب، عدم توانایی در جذب مواد مغذی و سمیت برخی عناصر رخ می‌دهد سایر محققین نیز به این نتایج دست پیدا کرده اند به عنوان مثال شوری رشد گیاه فلفل را از طریق اثر گذاری بر روی جذب آب و اختلال در فرایندهای بیوشیمیایی محدود می‌کند (Zhu and Gong, 2014) تنش شوری سبب کاهش رشد گیاه از طریق کاهش پتانسیل اسمزی و عدم تعادل تغذیه‌ای می شود (Munns and Tester, 2008) رشد گیاهان تحت شرایط شور کاهش پیدا می‌کند، اما مقدار کاهش آن به سطح نمک، شرایط محیطی، نوع گیاهان و مراحل رشد بستگی دارد (Ferreira-Silva *et al.*, 2008). نتایج تحقیقی نشان داد که با وجود شوری زیاد در محیط ریشه، مقدار آب، در گیاهان را کاهش می‌دهد، به طوری که باعث محدودیت در تقسیم سلولی و کاهش حجم سلول‌های برگ شده و در نتیجه وزن تر اندام هوایی کاهش می‌یابد Wang *et al.*, (2001). با افزایش سطح شوری فتوسنتز کاهش می‌یابد که این امر منجر به کاهش وزن ریشه می‌شود (Munns *et al.*, 2000). شوری سبب اختلالاتی همچون کاهش پتانسیل اسمزی و بر هم خوردن تعادل عناصر غذایی می شود که این موارد در رشد ریشه و در نتیجه بر وزن ریشه اثر می‌گذارد (Khan *et al.*, 2009).

**جدول ۳- اثر سطوح شوری و کاربرد مواد بهبود دهنده شیمیایی و آلی بر وزن خشک اندام هوایی فلفل دلمه‌ای (گرم بر گلدان)**

| | | سطوح شوری | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | تیمار | $S_0$ | $S_1$ | $S_2$ | $S_3$ | میانگین |
| سطوح بهبود دهنده رشد | شاهد | 1.84 bc | 3.14 ab | 1.26 bc | 0.645 c | 1.72 A |
| | اسید هیومیک | 2.13 a-c | 4.06 a | 2.23 a-c | 0.840 c | 2.31 A |
| | سیلیسیم | 2.51 a-c | 2.51 a-c | 1.77 bc | 0.713 c | 1.87 A |
| | اسید هیومیک + سیلیسیم | 3.02 ab | 2.20 a-c | 1.91 bc | 0.663 c | 1.95 A |
| | میانگین | 2.37 AB | 2.98 A | 1.79 BC | 0.715 C | |

در هر ردیف یا ستون، میانگین های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتما پنج درصد، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند

از میان تیمارهای بهبود دهنده رشد استفاده از ۱ گرم اسید هیومیک در هر کیلوگرم خاک در طول دوره رشد، توانست تا حدی زیست توده گیاه را در شرایط شور افزایش می‌دهد. اسید هیومیک با بهبود جذب آب و مواد مغذی و همچنین کاهش سمیت عناصر، اثرات منفی شوری را تعدیل می‌کند. بنابراین، اسید هیومیک می‌تواند به عنوان یک عامل تعدیل کننده برای کاهش اثرات منفی شوری بر گیاهان و حفظ یا حتی افزایش زیست توده آنها مفید باشد.

در آزمایشی اثرات تنش شوری با محلول پاشی اسید هیومیک کاهش یافت و باعث بهبود رشد گیاه ذرت تحت تنش شوری شد (Kaya *et al.*, 2018). بهبود رشد ناشی از اسید هیومیک به دلیل وجود چندین ماده مغذی ضروری مورد نیاز برای رشد طبیعی گیاهان است (Cimrin *et al.*, 2010). (Daur and Bakhashwain, 2013) گزارش کردند که کاربرد اسید هیومیک در غلظت ۲۵ کیلوگرم در هکتار باعث افزایش کیفیت و رشد ذرت علوفه در شرایط مختلف محیطی شد. به طور مشابه، در سایر محصولات زراعی مانند لوبیا (Meganid *et al.*, 2015) و فلفل (Cimrin *et al.*, 2010)، کاربرد اسید هیومیک باعث بهبود رشد آن‌ها در شرایط تنش شوری گردید.

**جدول ۴- اثر سطوح شوری و کاربرد مواد بهبود دهنده شیمیایی و آلی بر وزن خشک ریشه فلفل دلمه‌ای (گرم بر گلدان)**

| | | سطوح شوری | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | تیمار | $S_0$ | $S_1$ | $S_2$ | $S_3$ | میانگین |
| سطوح بهبود دهنده | شاهد | 0.690 a-e | 0.626 b-f | 0.303 c-f | 0.233 d-f | 0.463 B |
| | اسید هیومیک | 0.773 a-c | 1.136 a | 0.693 a-e | 0.280 c-f | 0.720 A |
| | سیلیسیم | 1.10 ab | 0.753 a-c | 0.606 b-f | 0.196 ef | 0.666 AB |
| | اسید هیومیک + سیلیسیم | 1.09 ab | 0.726 a-d | 0.543 c-f | 0.133 f | 0.623 AB |
| | میانگین | 0.915 A | 0.810 A | 0.536 B | 0.210 C | |

در هر ردیف یا ستون، میانگین های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتما پنج درصد، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند

## ارتفاع بوته

بر اساس نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲)، اثر شوری بر ارتفاع ساقه در سطح احتمال ۱ معنی‌دار بود. نتایج اثر شوری نشان می‌دهد که سطوح $S_0$ ، $S_1$و $S_2$ شوری تفاوت معناداری با یکدیگر نداشته و تنها سطح $S_3$ شوری با کاهش ۶۵ درصدی نسبت به شاهد معنادار بوده است (جدول ۵). ارتفاع ساقه یک نماد مهم رشد و عملکرد نهایی گیاه می‌باشد که از غلظت بالای نمک در خاک تاثیر منفی می‌پذیرد. کاهش ارتفاع به علت افزایش غلظت نمک می تواند به خاطر کاهش حرکت عناصر غذایی از خاک به گیاه باشد (Alam *et al.*, 2020). مامتا گزارش داد که کنار هندی کشت داده شده در محیط با شوری متوسط منجر به کاهش طول ساقه و سطح برگ شده است Bhatt *et al.* (2008). محققان بیان کردند که تنش شوری که نتیجه آن کاهش پتانسیل اسمزی است موجب کاهش جذب آب و کاهش آب سلول می شود و از طویل شدن سلول‌ها جلوگیری می‌کند، به طوریکه پس از رفع کاهش پتانسیل اسمزی طویل شدن و گسترش سلول به کندی صورت می گیرد (Mashi *et al.*, 2008). تنش شوری می‌تواند از طریق کاهش در تقسیم سلولی سبب کاهش ارتفاع بوته شود (Soleymani *et al.*, 2008).

**جدول ۵- اثر سطوح شوری و کاربرد مواد بهبود دهنده شیمیایی و آلی بر ارتفاع بوته فلفل دلمه‌ای (سانتی‌متر)**

| | | سطوح شوری | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | تیمار | $S_0$ | $S_1$ | $S_2$ | $S_3$ | میانگین |
| سطوح بهبود دهنده | شاهد | 20.6 a-c | 20.3 a-d | 15.0 b-d | 10.8 d | 16.6 A |
| | اسید هیومیک | 19.2 a-d | 26.4 a | 22.1 ab | 17.2 b-d | 21.2 A |
| | سیلیسیم | 19.0 a-d | 22.7 ab | 19.5 a-d | 11.9 d | 18.3 A |
| | اسید هیومیک + سیلیسیم | 21.3 ab | 23.1 ab | 21.4 ab | 12.7 cd | 19.6 A |
| | میانگین | 20.0 A | 23.1 A | 19.5 A | 13.1 B | |

در هر ردیف یا ستون، میانگین های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتما پنج درصد، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند

## غلظت سدیم اندام هوایی و ریشه

اثر شوری بر غلظت سدیم اندام هوایی و ریشه در سطح احتمال ۱ معنی‌دار بود (جدول ۲). سطوح $S_1$، $S_2$ و $S_3$ شوری به ترتیب سبب افزایش ۲۵۸، ۵۷۶ و ۷۴۵ درصدی غلظت سدیم اندام هوایی نسبت به شاهد شدند ( جدول ۶). در ریشه نیز غلظت سدیم با افزایش شوری افزایش یافت اما این افزایش نسبت به اندام هوایی کمتر بوده به طوریکه سطوح $S_1$، $S_2$ و $S_3$ شوری به ترتیب سبب افزایش ۱۷۸، ۲۵۶ و ۴۵۳ درصدی غلظت سدیم ریشه نسبت به شاهد شدند ( جدول ۷). افزودن تیمارها سبب

افزایش غلظت سدیم اندام هوایی گیاه شد که این افزایش تنها در تیمار کاربرد همزمان اسید هیومیک و سیلیسیم با ۷۶ درصد تغییر نسبت به شاهد معنی‌دار شد ( جدول ۶).

**جدول ۶- اثر سطوح شوری و کاربرد مواد بهبود دهنده شیمیایی و آلی بر غلظت سدیم در اندام هوایی فلفل دلمه‌ای (درصد)**

| | سطوح شوری | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | تیمار | $S_0$ | $S_1$ | $S_2$ | $S_3$ | میانگین |
| سطوح بهبود دهنده | شاهد | 0.115 f | 1.39 c-e | 1.62 b-d | 2.52 ab | 0.880 B |
| | اسید هیومیک | 0.200 f | 0.801 d-f | 2.21 a-c | 2.81 a | 1.36 AB |
| | سیلیسیم | 0.471 ef | 0.919 d-f | 2.24 a-c | 2.40 ab | 1.08 AB |
| | اسید هیومیک + سیلیسیم | 0.448 ef | 1.47 c-e | 2.24 a-c | 2.63 ab | 1.55 A |
| | میانگین | 0.318 C | 1.14 B | 2.15 A | 2.69 A | |

در هر ردیف یا ستون، میانگین های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتما پنج درصد، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند

اما مواد بهبود دهنده نتوانستند اثر معناداری روی غلظت سدیم ریشه نسبت به شاهد ایجاد کنند به نحوی که تیماهای حاوی اسید هیومیک سبب افزایش غلظت سدیم و تیمار سیلیسیم سبب کاهش غلظت سدیم در گیاه شدند ( جدول ۷). نتایج تحقیق حاضر نشان داد که افزایش شوری سبب افزایش جذب سدیم شد که با مطالعات انجام شده توسط (Archangi *et al.*, Mazloomi and) Ronaghi, 2012; 2012 مطابقت دارد. در گیاه رزماری مشاهده شد که افزایش شوری سبب افزایش تجمع سدیم در گیاه شد (Vojodi *et al.*, 2018). کاربرد سیلیسیم باعث افزایش فعالیت $H^+$-ATPase در غشای پلاسمایی و تونوپلاست می‌شود. افزایش فعالیت $H^+$-ATPase پس از کاربرد سیلیسیم، خروج یون سدیم را به خارج از سلول تسهیل می‌کند (Liang et al., 2006b).

**جدول ۷- اثر سطوح شوری و کاربرد مواد بهبود دهنده شیمیایی و آلی بر غلظت سدیم در ریشه فلفل دلمه‌ای (درصد)**

| | سطوح شوری | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | تیمار | $S_0$ | $S_1$ | $S_2$ | $S_3$ | میانگین |
| سطوح بهبود دهنده | شاهد | 0.057 ef | 0.114 c-f | 0.148 b-e | 0.150 b-e | 0.106 AB |
| | اسید هیومیک | 0.072 d-f | 0.116 c-f | 0.153 b-e | 0.261 a | 0.140 A |
| | سیلیسیم | 0.019 f | 0.102 c-f | 0.101 c-f | 0.250 ab | 0.092 B |
| | اسید هیومیک + سیلیسیم | 0.020 f | 0.123 c-f | 0.183 a-d | 0.210 a-c | 0.110 AB |
| | میانگین | 0.041 C | 0.114 B | 0.146 B | 0.227 A | |

در هر ردیف یا ستون، میانگین های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتما پنج درصد، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند

## غلظت کلسیم اندام هوایی و ریشه

اثر شوری و مواد بهبود دهنده بر غلظت کلسیم اندام هوایی و ریشه در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود (جدول ۲). انجام آبیاری با آب شوری موجب افزایش غلظت کلسیم اندام هوایی گیاه گردید، به طوریکه سطح $S_3$ شوری سبب افزایش۱۷۶ درصدی غلظت کلسیم نسبت به شاهد گردید (جدول ۸). افزایش شوری خاک سبب افزایش غلظت کلسیم ریشه نیز شد اما این افزایش تا سطح $S_2$ نسبت شاهد معنادار نبوده و تنها سطح $S_3$ با افزایش ۸۱ درصدی توانسته اثر معنی‌داری ایجاد کند (جدول ۹). اسید

هیومیک سبب افزایش و سیلیسیم سبب کاهش غلظت کلسیم دراندام هوایی شده‌اند (جدول ۸) و در ریشه همه تیمارها سبب کاهش غلظت کلسیم شده‌اند، به دین صورت که تیمارهای اسید هیومیک، سیلیسیم و کاربرد همزمان اسید هیومیک و سیلیسیم به ترتیب ۲۸/۳۸، ۴۶/۶۷ و ۴۵/۴۴ درصد غلظت کلسیم ریشه نسبت به شاهد را کاهش دادند (جدول ۹).

در بیشتر گیاهان زراعی، شوری باعث کاهش سطح کلسیم می‌شود که منجر به نفوذپذیری غشا و سایر اثرات مضر آن می‌شود (Ashraf *et al*., 2004). به عنوان مثال در آزمایشی با اعمال تنش شوری، مقدار پتاسیم و کلسیم در برگ، ساقه و ریشه کاهش یافت (Tunçtürk *et al*., 2011). نتایج آزمایش حاضر نشان داد که با که با افزایش شوری غلظت کلسیم افزایش می‌یابد که این نتایج با مطالعات سایر محققین همسویی ندارد (Ashraf *et al*., 2004; Tunçtürk *et al*., 2011). اما در این آزمایش باید به این نکته توجه کرد که بیومس گیاه در سطوح بالای شوری تا ۷۰ درصد کاهش یافته است و همین دلیل باعث شده است که اثر غلیظ شدن کلسیم در گیاه رخ دهد.

**جدول ۸- اثر سطوح شوری و کاربرد مواد بهبود دهنده شیمیایی و آلی بر غلظت کلسیم در اندام هوایی فلفل دلمه‌ای (درصد)**

| | سطوح شوری | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | تیمار | $S_0$ | $S_1$ | $S_2$ | $S_3$ | میانگین |
| سطوح بهبود دهنده | شاهد | 1.64 d-g | 3.35 c-g | 3.64 b-e | 5.89 a | 3.63 AB |
| | اسید هیومیک | 1.50 fg | 3.84 bc | 5.50 ab | 4.00 bc | 3.70 A |
| | سیلیسیم | 1.58 e-g | 1.72 d-g | 2.47 c-g | 2.97 c-g | 2.18 C |
| | اسید هیومیک + سیلیسیم | 1.34 g | 3.43 c-f | 2.90 c-g | 3.68 b-d | 2.76 BC |
| | میانگین | 1.5 C | 3.09 B | 3.63 A | 4.17 A | |

در هر ردیف یا ستون، میانگین های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتما پنج درصد، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند

تاثیر اسید هیومیک بر جذب کلسیم در تولید هیدروپونیک گوجه فرنگی نشان داد که اسید هیومیک مقدار جذب کلسیم را افزایش داده اما میزان زیادی از اسید هیومیک باعث کاهش جذب کلسیم می‌شود (Türkmen *et al*,. 2004).

**جدول ۹- اثر سطوح شوری و کاربرد مواد بهبود دهنده شیمیایی و آلی بر غلظت کلسیم در ریشه فلفل دلمه‌ای (درصد)**

| | سطوح شوری | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | تیمار | $S_0$ | $S_1$ | $S_2$ | $S_3$ | میانگین |
| سطوح بهبود دهنده | شاهد | 1.28 c | 1.52 bc | 1.39 c | 4.04 a | 2.06 A |
| | اسید هیومیک | 1.18 c | 1.31 c | 1.40 c | 2.00 b | 1.47 B |
| | سیلیسیم | 1.32 c | 1.04 c | 0.982 c | 1.04 c | 1.10 C |
| | اسید هیومیک + سیلیسیم | 0.901 c | 1.01 c | 1.17 c | 1.41 c | 1.12 C |
| | میانگین | 1.17 B | 1.22 B | 1.24 B | 2.12 A | |

در هر ردیف یا ستون، میانگین های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتما پنج درصد، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند

## غلظت منیزیم اندام هوایی و ریشه

اثر شوری بر غلظت منیزیم اندام هوایی و ریشه در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود (جدول ۲). نتایج آزمایش نشان داد که غلظت منیزیم اندام هوایی با افزایش شوری افزایش یافت بطوری که سطوح $S_2$ و$S_3$ شوری به ترتیب سبب افزایش ۲۷ و ۴۵ درصدی غلظت منیزیم اندام هوایی نسبت به شاهد شدند (جدول ۱۰). افزایش غلظت منیزیم با افزایش شوری در ریشه گیاه نیز مشاهده شد و

سطوح $S_2$ و$S_3$ شوری توانستند غلظت منیزیم ریشه را ۵۹ و ۱۰۱ درصد نسبت شاهد افزایش دهند (جدول ۱۱). هیچ یک از تیمارهای بهبود دهنده نتوانستند اثر معنی داری در غلظت منیزیم نسبت به شاهد در گیاه ایجاد کنند.

**جدول ۱۰- اثر سطوح شوری و کاربرد مواد بهبود دهنده شیمیایی و آلی بر غلظت منیزیم در اندام هوایی فلفل دلمه‌ای (درصد)**

| | سطوح شوری | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | تیمار | $S_0$ | $S_1$ | $S_2$ | $S_3$ | میانگین |
| سطوح بهبود دهنده | شاهد | 0.199 cd | 0.318 b-d | 0.345 b-d | 0.299 b-d | 0.290 AB |
| | اسید هیومیک | 0.210 cd | 0.249 cd | 0.365 a-c | 0.502 a | 0.331 A |
| | سیلیسیم | 0.243 cd | 0.207 cd | 0.278 b-d | 0.262 b-d | 0.247 B |
| | اسید هیومیک + سیلیسیم | 0.185 d | 0.238 cd | 0.343 b-d | 0.422 ab | 0.297 AB |
| | میانگین | 0.209 B | 0.253 B | 0.333 A | 0.371 A | |

در هر ردیف یا ستون، میانگین های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتما پنج درصد، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند

محققان دریافتند که شوری حاصل از سدیم کلرید غلظت منیزیم برگ در مرکبات را کاهش می‌دهد (Ferreyra *et al.*, 1997)، با این حال افزایش شوری همیشه با کاهش منیزیم در برگ همراه نیست برنستین و همکاران دریافتند که با افزایش شوری سدیم کلرید غلظت منیزیم در چغندر کاهش می یابد اما در ۵ نوع دیگر سبزیجات اثری ندارد (Bernstein *et al.*, 1974). درمطالعه‌ای روند کاهشی منیزیم و کلسیم در شرایط شور گزارش شده است (Singh *et a*, 2016).

**جدول ۱۱- اثر سطوح شوری و کاربرد مواد بهبود دهنده شیمیایی و آلی بر غلظت منیزیم در ریشه فلفل دلمه‌ای (میلی‌گرم بر کیلوگرم)**

| | سطوح شوری | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | تیمار | $S_0$ | $S_1$ | $S_2$ | $S_3$ | میانگین |
| سطوح بهبود دهنده | شاهد | 0.199 cd | 0.318 b-d | 0.345 b-d | 0.299 b-d | 0.290 AB |
| | اسید هیومیک | 0.210 cd | 0.249 cd | 0.365 a-c | 0.502 a | 0.331 A |
| | سیلیسیم | 0.243 cd | 0.207 cd | 0.278 b-d | 0.262 b-d | 0.247 B |
| | اسید هیومیک + سیلیسیم | 0.185 d | 0.238 cd | 0.343 b-d | 0.422 ab | 0.297 AB |
| | میانگین | 0.209 B | 0.253 B | 0.333 A | 0.371 A | |

در هر ردیف یا ستون، میانگین های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتما پنج درصد، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند

## نتیجه گیری

نتایج تحقیق به وضوح نشان می‌دهد که شوری به عنوان یک تنش محیطی مهم، رشد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. کاهش وزن خشک اندام هوایی و ریشه، کاهش ارتفاع بوته و اختلال در جذب عناصر غذایی، همگی موید این مطلب هستند. این تأثیرات منفی عمدتاً به دلیل کاهش پتانسیل اسمزی، اختلال در جذب آب و مواد مغذی، و افزایش تولید رادیکال‌های آزاد در سلول‌های گیاهی است.

اسید هیومیک به عنوان یک ماده آلی طبیعی، نقش مهمی در بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی خاک و افزایش مقاومت گیاهان به تنش‌های محیطی از جمله شوری دارد. نتایج این تحقیق نیز تأیید می‌کند که کاربرد اسید هیومیک باعث افزایش وزن خشک اندام هوایی و ریشه، بهبود جذب عناصر غذایی و در نتیجه افزایش تحمل گیاه به شوری می‌شود. از مکانیسم‌های احتمالی اثر اسید هیومیک می‌توان

به این موارد اشاره کرد، بهبود شرایط خاک، اسید هیومیک با ایجاد کمپلکس با یون‌های فلزی و مواد آلی، ساختار خاک را بهبود بخشیده و باعث افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک می‌شود. افزایش جذب عناصر غذایی، اسید هیومیک با تشکیل کمپلکس با عناصر غذایی، از تثبیت آن‌ها در خاک جلوگیری کرده و جذب آن‌ها توسط گیاه را تسهیل می‌کند. تحریک رشد ریشه، اسید هیومیک با تحریک رشد ریشه، باعث افزایش سطح جذب آب و مواد مغذی توسط گیاه می‌شود. افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، اسید هیومیک با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، به گیاه کمک می‌کند تا با تنش‌های اکسیداتیو ناشی از شوری مقابله کند.

افزایش غلظت سدیم در اثر افزایش شوری در گیاه قابل انتظار بود. از آن جایی که ما از نمک سدیم کلرید برای ایجاد شوری استفاده کردیم، غلظت سدیم درخاک بالا رفته و به موجب آن غلظت سدیم در گیاه افزایش یافت. در میان تیمار های افزوده شده تنها مصرف محلول پاشی سیلیسیم ۱ درصد توانست غلظت سدیم در گیاه را کاهش دهد که ممکن است به دلیل افزایش فعالیت $H^+$-ATPase در غشای پلاسمایی و تونوپلاست باشد زیرا افزایش فعالیت $H^+$-ATPase خروج یون سدیم را به خارج از سلول تسهیل می‌کند. در مطالعه حاضر غلظت کلسیم و منیزیم با افزایش شوری افزایش یافت، درحالی که در بسیاری از مطالعات افزایش شوری سبب کاهش غلظت این دو عنصر درگیاه می‌شوند، از مشاهده این پدیده می‌توان به این نتیجه رسید که از آن جایی که وزن خشک گیاه تا بیش از ۷۰ درصد کاهش یافته، اثر غلیظ شدن عناصر در گیاه روی داده است.

تأثیر متقابل شوری و مواد بهبود دهنده نتایج نشان می‌دهد که اثر مواد بهبود دهنده مانند اسید هیومیک و سیلیسیم بر جذب عناصر غذایی متفاوت است و این اثر به نوع ماده بهبود دهنده، دوز مصرفی و شرایط محیطی بستگی دارد. نهایتا نتیجه‌ای که از این تحقیق بدست آمد می تواند توجیه پذیری مصرف اسید هیومیک در سطوح پایین شوری را نشان دهد. اما مصرف سیلیسیم نتایج قابل توجهی ارائه نکرد که بتوان مصرف آن را توصیه کرد.

***References***


1. Aktas, H., Abak, K., and Cakmak, I. (2006). Genotypic variation in the response of pepper to salinity. *Scientia Horticulturae*, 110(3), 260-266. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.07.017
2. Alam, M., Khan, M. A., Imtiaz, M., Khan, M. A., Naeem, M., Shah, S. A., ... & Khan, L. (2020). Indole-3-Acetic Acid Rescues Plant Growth and Yield of Salinity Stressed Tomato (Lycopersicon esculentum L.). *Gesunde Pflanzen*, 72(1), 87-95.
3. Almeida, D. M., Oliveira, M. M., and Saibo, N. J. (2017). Regulation of Na+ and K+ homeostasis in plants: towards improved salt stress tolerance in crop plants. *Genetics and molecular biology*, *40*, 326-345. https://doi.org/10.1590/1678-4685-gmb-2016-0106
4. Andriesse, J. P. (1988). Nature and management of tropical peat soils (No. 59). *Food and Agriculture Org.*
5. Archangi, A., Khodambashi, M., and Mohammadkhani, A. (2012). The effect of salt stress on morphological characteristics and Na+, K+ and Ca+ ion contents in medicinal plant fenugreek (Trigonella foenum graecum L.) under hydroponic culture. *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture-Isfahan University of Technology*, 3(2), 33-41.
6. Ashraf, M. F. M. R., and Foolad, M. (2007). Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and experimental botany*, 59(2), 206-216. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.12.006
7. Ashraf, M. Y., Hussain, F., Akhter, J., Gul, A. T. T. I. Y. A., Ross, M., and Ebert, G. E. O. R. G. (2008). Effect of different sources and rates of nitrogen and supra optimal level of potassium fertilization on growth, yield and nutrient uptake by sugarcane grown under saline conditions. *Pak. J. Bot*, 40(4), 1521-1531.
8. Ashraf, M., Mukhtar, N., Rehman, S. and Rha, E.S. 2004. Salt-induced changes in photosynthetic activity and growth in a potential medicinal plant bishop's weed (*Ammi majus L*). *Photosynthetica*, 42: 543-550. https://doi.org/10.1007/S11099-005-0011-4
9. Bernstein, L., Francois, L. E., and Clark, R. A. (1974). Interactive effects of salinity and fertility on yields of grains and vegetables 1. *Agronomy Journal*, 66(3), 412-421. https://doi.org/10.2134/agronj1974.00021962006600030023x
10. Bhatt, M. J., Patel, A. D., Bhatti, P. M., & Pandey, A. N. (2008). Effect of soil salinity on growth, water status and nutrient accumulation in seedlings of Ziziphus mauritiana (Rhamnaceae). Journal of Fruit and Ornamental *Plant Research*, 16(1), 383-401.
11. Böhme, M., and Lua, H. (1996, September). Influence of mineral and organic treatments in the rhizosphere on the growth of tomato plants. *In International Symposium Growing Media and Plant Nutrition in Horticulture 450 (pp. 161-168). https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1997.450.18*
12. 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
13. Çimrin, K. M., Türkmen, Ö., Turan, M., and Tuncer, B. (2010). Phosphorus and humic acid application alleviate salinity stress of pepper seedling. *African Journal of Biotechnology*, *9*(36).
14. Daur, I., and Bakhashwain, A. A. (2013). Effect of humic acid on growth and quality of maize fodder production. *Pak. J. Bot*, *45*(S1), 21-25.
15. de Lacerda, C. F., Cambraia, J., Oliva, M. A., and Ruiz, H. A. (2005). Changes in growth and in solute concentrations in sorghum leaves and roots during salt stress recovery. *Environmental and Experimental Botany*, 54(1), 69-76. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2004.06.004

16. del Amor, F. M., and Cuadra-Crespo, P. (2012). Plant growth-promoting bacteria as a tool to improve salinity tolerance in sweet pepper. *Functional Plant Biology*, 39(1), 82-90. https://doi.org/10.1071/FP11173
17. Delfine, S., Tognetti, R., Desiderio, E., and Alvino, A. (2005). Effect of foliar application of N and humic acids on growth and yield of durum wheat. *Agronomy for sustainable Development*, *25*(2), 183-191. https://doi.org/10.1051/agro:2005017
18. Dragišić Maksimović, J., Bogdanović, J., Maksimović, V., and Nikolic, M. (2007). Silicon modulates the metabolism and utilization of phenolic compounds in cucumber (Cucumis sativus L.) grown at excess manganese. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 170(6), 739-744. https://doi.org/10.1002/jpln.200700101
19. Epstein, E. (1999). Silicon. *Annual review of plant biology*, 50(1), 641-664. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.50.1.641
20. Ferreira-Silva, S. L., Silveira, J. A., Voigt, E. L., Soares, L. S., and Viégas, R. A. (2008). Changes in physiological indicators associated with salt tolerance in two contrasting cashew rootstocks. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 20(1), 51-59.
21. Ferreyra, R. E., Aljaro, A. U., Ruiz, R. S., Rojas, L. P., and Oster, J. D. (1997). Behavior of 42 crop species grown in saline soils with high boron concentrations. *Agricultural Water Management*, 34(2), 111-124. https://doi.org/10.1016/S0378-3774(97)00014-0
22. Flam-Shepherd, R., Huynh, W. Q., Coskun, D., Hamam, A. M., Britto, D. T., and Kronzucker, H. J. (2018). Membrane fluxes, bypass flows, and sodium stress in rice: the influence of silicon. *Journal of Experimental Botany*, *69*(7), 1679-1692. https://doi.org/10.1093/jxb/erx460
23. Gee, G. W., and Bauder, J. W. (1979). Particle size analysis by hydrometer: a simplified method for routine textural analysis and a sensitivity test of measurement parameters. *Soil Science Society of America Journal, 43(5), 1004-1007*. https://doi.org/10.2136/sssaj1979.03615995004300050038x
24. Gu, H. H., Zhan, S. S., Wang, S. Z., Tang, Y. T., Chaney, R. L., Fang, X. H., ... and Qiu, R. L. (2012). Silicon-mediated amelioration of zinc toxicity in rice (Oryza sativa L.) seedlings. *Plant and soil*, 350(1-2), 193-204. https://doi.org/10.1007/s11104-011-0894-8
25. Hashemi, A., Abdolzadeh, A., and Sadeghipour, H. R. (2010). Beneficial effects of silicon nutrition in alleviating salinity stress in hydroponically grown canola, Brassica napus L., plants. *Soil Science and Plant Nutrition*, *56*(2), 244-253. https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2009.00443.x
26. Isaac, R. A., and Kerber, J. D. (1971). Atomic absorption and flame photometry: Techniques and uses in soil, plant, and water analysis. *Instrumental methods for analysis of soils and plant tissue*, 17-37. https://doi.org/10.2136/1971.instrumentalmethods.c2
27. Kaya, C., Akram, N. A., Ashraf, M., and Sonmez, O. (2018). Exogenous application of humic acid mitigates salinity stress in maize (Zea mays L.) plants by improving some key physico-biochemical attributes. *Cereal Research Communications*, *46*(1), 67-78. https://doi.org/10.1556/0806.45.2017.064
28. Khan, M. A., von Witzke-Ehbrecht, S., Maass, B. L., and Becker, H. C. (2009). Relationships among different geographical groups, agro-morphology, fatty acid composition and RAPD marker diversity in safflower (Carthamus tinctorius). *Genetic Resources and Crop Evolution*, 56(1), 19-30. https://doi.org/10.1007/s10722-008-9338-6
29. Liang, Y., Zhang, W., Chen, Q., Liu, Y., and Ding, R. (2006). Effect of exogenous silicon (Si) on H+-ATPase activity, phospholipids and fluidity of plasma membrane in leaves of salt-stressed barley (Hordeum vulgare L.). *Environmental*

*and Experimental Botany*, *57*(3), 212-219. http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.05.012

30. 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(3), 421-428.* https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x
31. Lycoskoufis, I. H., Savvas, D., and Mavrogianopoulos, G. (2005). Growth, gas exchange, and nutrient status in pepper (Capsicum annuum L.) grown in recirculating nutrient solution as affected by salinity imposed to half of the root system. *Scientia Horticulturae*, 106(2), 147-161. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2005.02.022
32. Maas, E. V., and Hoffman, G. J. (1977). Crop salt tolerance–current assessment. *Journal of the irrigation and drainage division*, 103(2), 115-134. https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0001137
33. Mashi, A., GALESHI, S., ZEYNALI, E., & NOURINIA, A. (2008). SALINITY EFFECT ON SEED YIELD AND YIELD COMPONENTS IN FOUR HULL-LESS BARLEY.
34. Mazloomi, F., and Ronaghi, A. (2012). Effect of salinity and phosphorus on growth and chemical composition of two varieties of spinach. *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture-Isfahan University of Technology*, 3(1), 85-96. .(*inPersian*)
35. Meganid, A. S., Al-Zahrani, H. S., and El-Metwally, M. S. (2015). Effect of humic acid application on growth and chlorophyll contents of common bean plants (Phaseolus vulgaris L.) under salinity stress conditions. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, *4*(5), 2651-2660. http://dx.doi.org/10.15680/IJIRSET.2015.0405001
36. Munns, R., and Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 59, 651-681. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911
37. Munns, R., Guo, J., Passioura, J. B., and Cramer, G. R. (2000). Leaf water status controls day-time but not daily rates of leaf expansion in salt-treated barley. *Functional Plant Biology*, 27(10), 949-957. http://dx.doi.org/10.1071/PP99193
38. Nelson, D. W. Sommer. LE 1996. Total Carbon, Organic Carbon and Organic Matter, Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods. *Soil Science of America and American Society of Argonomy, SSSA, Page, 961.* https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c34
39. Oron, G., DeMalach, Y., Gillerman, L., David, I., and Rao, V. P. (1999). Improved saline-water use under subsurface drip irrigation. *Agricultural Water Management*, 39(1), 19-33. https://doi.org/10.1016/S0378-3774(98)00088-2
40. Paksoy, M., Türkmen, Ö., and Dursun, A. (2010). Effects of potassium and humic acid on emergence, growth and nutrient contents of okra (Abelmoschus esculentus L.) seedling under saline soil conditions. *African Journal of Biotechnology*, *9*(33).
41. Parvaiz, M. (2014). Response of Maize to salt stress a critical review. *International Journal of Healthcare Sciences (IJHS)*, 1(1), 13-25.
42. Rohanipoor, A., Norouzi, M., Moezzi, A., and Hassibi, P. (2013). Effect of silicon on some physiological properties of maize (Zea mays) under salt stress. *Journal of Biological and Environmental Sciences*, *7*(20).
43. Shahbaz, M., and Ashraf, M. (2013). Improving salinity tolerance in cereals. *Critical reviews in plant sciences*, *32*(4), 237-249. https://doi.org/10.1080/07352689.2013.758544
44. Singh, A., Sharma, P.C., Meena, M.D., Kumar, A., Mishra, A.K., Kumar, P., Chaudhari, S.K and Sharma, D.K. 2016. Effect of salinity on gas exchange parameters and ionic relations in bael, Aegle marmelos https://doi.org/10.5958/0974-0112.2016.00017.7

45. SOLEYMANI, M. R., KAFI, M., ZIAEI, M., & SHABAHANG, J. (2008). EFFECT OF LIMITED IRRIGATION WITH SALINE WATER ON FORAGE OF TWO LOCAL POPULATIONS OF KOCHIA SCOPARIA L. SCHRAD.
46. Song, A., Li, P., Li, Z., Fan, F., Nikolic, M., and Liang, Y. (2011). The alleviation of zinc toxicity by silicon is related to zinc transport and antioxidative reactions in rice. *Plant and Soil*, 344(1-2), 319-333. https://doi.org/10.1007/s11104-011-0749-3
47. Sumner, M. E., and Miller, W. P. (1996). Cation exchange capacity and exchange coefficients. *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods, 5, 1201-1229.* https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c40
48. Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity. *Methods of soil analysis: part 3 chemical methods, 5, 475-490.* https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c16
49. Tunçtürk, M., Tunçtürk, R., Yildirim, B., and Çiftçi, V. (2011). Effect of salinity stress on plant fresh weight and nutrient composition of some Canola (Brassica napus L.) cultivars. *African Journal of Biotechnology*, 10(10), 1827-1832. https://doi.org/10.4314/AJB.V10I10
50. Türkmen, Ö., Dursun, A., Turan, M., and Erdinç, Ç. (2004). Calcium and humic acid affect seed germination, growth, and nutrient content of tomato (Lycopersicon esculentum L.) seedlings under saline soil conditions. Acta Agriculturae Scandinavica, *Section B-Soil and Plant Science*, 54(3), 168-174. https://doi.org/10.1080/09064710310022014
51. Tuteja, N. (2007). Mechanisms of high salinity tolerance in plants. *Methods in enzymology*, *428*, 419-438. https://doi.org/10.1016/s0076-6879(07)28024-3
52. Vojodi, M. L., Hassanpour, A. M., and Valizadeh, K. R. (2018). Effect of NaCl Salinity and ZnSO4 Foliar Application on Yield and Some Physiological Traits of Tagetes erecta L. (In Persian with English abstract) https://doi.org/10.22055/ppd.2020.31067.1825
53. Wang, D., Shannon, M. C., and Grieve, C. M. (2001). Salinity reduces radiation absorption and use efficiency in soybean. *Field Crops Research*, 69(3), 267-277. https://doi.org/10.1016/S0378-4290(00)00154-4
54. Wang, X. S., and Han, J. G. (2007). Effects of NaCl and silicon onion distribution in the roots, shoots and leaves of two alfalfa cultivars with different salt tolerance. *Soil Science and Plant Nutrition*, *53*(3), 278-285. https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2007.00135.x
55. Watanabe, F. S., and Olsen, S. R. (1965). Test of an ascorbic acid method for determining phosphorus in water and NaHCO3 extracts from soil. *Soil Science Society of America Journal, 29(6), 677-678.* https://doi.org/10.2136/sssaj1965.03615995002900060025x
56. Winfield, M. O., Lu, C., Wilson, I. D., Coghill, J. A., and Edwards, K. J. (2010). Plant responses to cold: transcriptome analysis of wheat. *Plant Biotechnology Journal*, 8(7), 749-771. https://doi.org/10.1111/j.1467-7652.2010.00536.x
57. Yin, L., Wang, S., Li, J., Tanaka, K., and Oka, M. (2013). Application of silicon improves salt tolerance through ameliorating osmotic and ionic stresses in the seedling of Sorghum bicolor. *Acta physiologiae plantarum*, *35*(11), 3099-3107. http://dx.doi.org/10.1007/s11738-013-1343-5
58. Yiu, J. C., Tseng, M. J., Liu, C. W., and Kuo, C. T. (2012). Modulation of NaCl stress in Capsicum annuum L. seedlings by catechin. *Scientia horticulturae*, 134, 200-209.
59. Zandonadi, D. B., Canellas, L. P., and Façanha, A. R. (2007). Indolacetic and humic acids induce lateral root development through a concerted plasmalemma and tonoplast H+ pumps activation. *Planta*, 225(6), 1583-1595. https://doi.org/10.1007/s00425-006-0454-2

60. Zhu, J. K. (2002). Salt and drought stress signal transduction in plants. *Annual review of plant biology*, *53*, 247. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.53.091401.143329
61. Zhu, Y., and Gong, H. (2014). Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(2), 455-472. https://doi.org/10.1007/s13593-013-0194-1
62. Zhu, Z., Wei, G., Li, J., Qian, Q., and Yu, J. (2004). Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (Cucumis sativus L.). *Plant Science*, *167*(3), 527-533. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.04.020

پژوهش‌های خاک / الف / جلد ۳۸ / شماره۲ تابستان/ ۱۴۰۳/ ۲۱۰-۱۹۷
https://doi.org/10.22092/IJSR.2024.366549.756

# اثرهای اسید گلوتامیک و اسید آسپارتیک در کاهش تنش سرب در گیاه بادرنجبویه (*Melissa officianlis*)

زهرا رمضانی[۱]، علی اشرف امیری نژاد[۲]* و مختار قبادی[۳]

۱.گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.
zahra.ramezani49400@gmail.com
۲.نویسنده مسئول، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.
a.amirinejad@razi.ac.ir
۳.گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.
ghobadi.m@razi.ac.ir

« مقاله پژوهشی»
دریافت: ۱۴۰۳/۵/۱۳ و پذیرش:۱۴۰۳/۷/۲۵

## چکیده

**استفاده از مواد کلات‌کننده به‌عنوان یک راه حل مناسب برای کاهش اثر فلزات سنگین در گیاهان معرفی شده است. برای بررسی اثرهای اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک بر کاهش تنش سرب در گیاه بادرنجبویه (*Dracocephalum ruyschiana*)، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل، در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در سال ۱۴۰۲ در گلخانه دانشگاه رازی انجام گرفت. تیمارهای آزمایشی شامل آلودگی سرب در سه سطح (۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک از نمک نیترات سرب)، اسید آسپارتیک در سه سطح (۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار) و اسید گلوتامیک در سه سطح (۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار) به‌صورت محلول‌پاشی برگی بودند. نتایج نشان داد که، بیشترین غلظت پرولین (۸/۱۲ میکرومول بر گرم) و قندهای محلول (۲/۹۴ میلی‌گرم بر گرم) شاخساره گیاه در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سرب و بدون اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک به‌دست آمد که نسبت به تیمار شاهد (بدون کاربرد سرب و عوامل کلات‌کننده)، به ترتیب افزایش ۳۲۰٪ و ۲۸۵٪ را نشان می‌داد. همچنین، بیشترین وزن خشک شاخساره و ریشه، ارتفاع گیاه، طول و حجم ریشه در تیمار ۲۰۰ میلی‌مولار اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک و بدون سرب به‌دست آمد. بطورکلی، استفاده از اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک به‌صورت اسپری برگی توانست بطور قابل ملاحظه‌ای اثرات مضر سرب بر ویژگی‌های رشدی گیاه را کاهش دهد. بنابراین، کاربرد این مواد کلات‌کننده یک راه حل مناسب در راستای کاهش اثرات تنش سرب در گیاه بادرنجبویه است.**

**کلمات کلیدی:** پرولین، مواد کلات‌کننده، اثر فلز سنگین، ویژگی رشدی گیاه

*-آدرس ایمیل نویسنده مسئول:a.amirinejad@razi.ac.ir

**مقدمه**

انباشت فلزات سنگین یک خطر زیست‌محیطی است که منجر به کاهش کیفیت خاک و بهره‌وری اراضی کشاورزی می‌شود. در این راستا، سرب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. سرب به‌عنوان یک عنصر بسیار سمی و غیرقابل تجزیه، می‌تواند به سرعت جذب و به بافت های گیاهی منتقل شود. پس از ورود به زنجیره غذایی، از طریق واکنش‌های مختلف بیوشیمیایی و آنزیمی، سرب می‌تواند به‌شدت به سلامت عمومی آسیب برساند (موسوی و همکاران، ۲۰۲۲).

سمیت سرب در گیاهان باعث بروز تغییر در شاخص‌های فیزیولوژیکی رشد، کاهش زیست توده بخش هوایی و ریشه، کاهش بیوسنتز کلروفیل، ایجاد کمپلکس با پروتئین‌ها و تجزیه کلروفیل می‌گردد (صوفی و همکاران، ۲۰۲۰). به‌عبارت دیگر، تنش سرب اگرچه دارای آثار مخرب بر رشد و عمکلرد گیاهان، اختلال در فعالیت‌های متابولیکی گیاه و جلوگیری از جذب آب می‌شود، اما مهم-ترین اثر تخریبی سرب در گیاهان، القا تنش‌های اکسیداتیو است که باعث تولید رادیکال‌های فعال اکسیژن می‌شود (حسین و همکاران، ۲۰۱۷). گیاهان برای مقابله با این رادیکال‌های آزاد، از پرولین به عنوان یک آنتی‌اکسیدان غیرآنزیمی استفاده می‌کنند. اسید آمینه پرولین که از گلوتامات ایجاد می‌شود نقش کلیدی در کاهش آثار ناشی از تنش سرب و افزایش تحمل در گیاهان از طریق مکانیزم-هایی مثل تنظیم اسمزی، حفاظت آنزیمی، پایداری پروتئین، تنظیم اسیدیته سلول و جمع‌آوری رادیکال‌های آزاد دارد (خان و همکاران، ۲۰۱۶).

در سال‌های اخیر مطالعات مختلفی در زمینه افزایش مقاومت گیاهان در برابر سمیت فلزات سنگین انجام شده است که از آن جمله، کاربرد روش‌های مدیریت تغذیه‌ای، قارچ‌ها و باکتری‌های محرک رشد گیاه و نیز استفاده از اسیدهای آمینه، به‌عنوان محرک‌های زیستی است (موسوی و همکاران، ۲۰۱۸). محرک‌های زیستی، مواد فعال بیولوژیکی هستند که می‌توانند رشد گیاه را تقویت کرده و مقاومت آن‌را در برابر ناملایمات محیطی بهبود بخشند (شافی و همکران، ۲۰۲۱). در این میان، اسید گلوتامیک و اسید آسپارتیک از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. این دو اسید آمینه در انتقال و ذخیره‌سازی نیتروژن دارای نقش اساسی هستند. اسید گلوتامیک نیز در تولید هورمون اکسین مؤثر بوده و پیش‌ساز کلروفیل است (جهانی و همکاران، ۱۳۹۶). کاظم‌پور و همکاران (۱۴۰۲) در بررسی اثر محلول‌پاشی اسیدهای آمینه بر خصوصیات مورفوفیزیولوژیک و اسانس آویشن دنایی تحت رژیم‌های مختلف آبیاری گزارش کرده-اند که اثرهای اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک در افزایش صفات رشدی ریشه گیاه می‌تواند به‌دلیل نقش این اسیدهای آمینه در سنتز پروتئین‌های حیاتی گیاه باشد که خود رشد و نمو بخش‌های مختلف و از جمله طول و حجم ریشه را موجب می‌شوند. از طرف دیگر، صبوری و همکاران (۲۰۱۴) نیز در مطالعه اثرهای اسیدهای آمینه بر عملکرد گیاه ریحان (*Ocimum basilicum*) بیان داشته که علت افزایش صفات ریشه گیاهان ممکن است به‌واسطه ساختار نیتروژنی اسیدهای آمینه باشد که زمینه جذب بیشتر سایر عناصر غذایی را فراهم می‌کنند.

امروزه، کشت گیاهان دارویی در حفظ سلامت جامعه، اشتغال‌زایی و نیز صادرات غیرنفتی نقش مهمی دارند. بادرنجبویه (*Melissa officianlis*) یک گیاه دارویی چند ساله معطر متعلق به خانواده نعناعیان و بومی مدیترانه است. از این گیاه برای بهبود قولنج دوران بچگی، رفع تنگی‌نفس مزمن، تب و لرز و از بین بردن برخی قارچ-ها، مسکن، تقویت حافظه، بهبود آلزایمر، درمان سردرد، سرگیجه، ضعف نارسایی قلبی، صرع و افسردگی استفاده می‌شود (عبدالخاطر و همکاران، ۲۰۲۳). سطح زیر کشت بادرنجبویه در کشور ۳۳ هکتار بوده که بطور عمده در استان‌های تهران، آذربایجان غربی و کرمانشاه تولید می‌شود (کوچکی و همکاران، ۱۳۸۳).

از آنجا که کشت گیاهان دارویی در بسیاری از نقاط ایران و از جمله در حاشیه جاده‌ها بسیار رایج است، لذا احتمال

آلودگی خاک اراضی تحت کشت به فلزات سنگین، از جمله سرب وجود دارد. تحقیقات متعددی در خصوص اثر مثبت بعضی اسیدهای آمینه بر کاهش تنش فلزات سنگین در گیاهان دارویی وجود دارد. در این پژوهش، تأثیر دو اسید آمینه گلوتامیک اسید و آسپارتیک اسید بر کاهش تنش سرب در بادرنجبویه مورد مطالعه قرار گرفت.

## مواد و روش‌ها

نمونه‌های خاک از لایه سطحی (۰-۲۰ سانتی-متری) اراضی دانشکده کشاورزی دانشگاه رازی با مشخصات جغرافیایی ۳۴ درجه و ۱۸ دقیقه شمالی و ۴۷ درجه و ۵ دقیقه شرقی جمع‌آوری شد. بعد از هواخشک کردن و عبور از الک دو میلی‌متری، برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل بافت به‌روش هیدرومتر، واکنش (pH) در نسبت ۱:۱ آب به خاک به‌وسیله pH سنج، هدایت الکتریکی (EC) در عصاره ۱:۱ آب به خاک به-وسیله هدایت‌سنج الکتریکی، کربنات کلسیم معادل به‌روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک و کربن آلی به‌روش اصلاح شده والکلی و بلک اندازه‌گیری گردید (کلوت، ۱۹۸۶). جدول ۱ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

**جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه**

| pH | EC ($dS\ m^{-1}$) | شن (%) | سیلت (%) | رس (%) | کربن آلی (%) | کربنات کلسیم (%) | CEC ($cmol_c\ kg^{-1}$) | سرب ($mg\ kg^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 7.8 | 0.28 | 10.5 | 64.5 | 25 | 0.83 | 21.7 | 14 | 0.18 |

آزمایش به‌صورت فاکتوریل، در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه دانشکده کشاورزی اجرا گردید. فاکتورهای آزمایشی شامل سرب (در سه سطح ۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)، اسید گلوتامیک و اسید آسپارتیک (هر کدام در سه سطح ۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار) به‌صورت محلول‌پاشی برگی بودند. انتخاب سطوح تیمارها بر اساس نتایج تحقیقات قبلی صورت گرفت (جهانی و همکاران، ۱۳۹۶: صوفی و همکاران، ۲۰۲۰: مسعودی و همکاران، ۲۰۲۰).

برای آلوده‌کردن خاک، مقادیر نمک نیترات سرب بر اساس سطوح آزمایش در آب مقطر حل و بر روی نمونه-های خاک اسپری و بعد با آن مخلوط گردید. خاک‌های آلوده به‌مدت یک ماه در شرایط نزدیک به رطوبت ظرفیت زراعی نگهداری تا برهم‌کنش به‌صورت کامل انجام پذیرد. سپس، نمونه خاک آلوده به سرب به مقدار هفت کیلوگرم در گلدان‌هایی با ابعاد ۲۵ سانتی‌متر ارتفاع و ۲۳ سانتی‌متر قطر دهانه ریخته شد.

در هر گلدان هشت بذر به‌صورت دایره‌ای کاشته شد. بذرهای بادرنجبویه از بانک ملی ژن بذر کرج تهیه شد. آبیاری به‌صورت روزانه و مطابق نیاز گیاه و کاهش رطوبت خاک از حد ظرفیت گلدانی، دو یا سه بار در هفته با روش وزنی انجام شد. در دوره آزمایش، میانگین روزانه دمای گلخانه ۲۳-۱۹و شبانه ۱۲-۹ درجه سانتی‌گراد بود. سه هفته پس از جوانه‌زنی، سه بوته در هر گلدان باقی گذاشته و بقیه تنک شدند. سپس، تیمار عوامل کلات‌کننده به‌صورت محلول‌پاشی برگی انجام گرفت. این عملیات دو بار دیگر با فاصله ده روز تکرار شد. تیمار شاهد با آب مقطر اسپری گردید. در پایان دوره رویشی و قبل از گلدهی (۶ هفته پس

از کاشت)، پارامترهای رشدی گیاه شامل ارتفاع گیاه، طول و حجم ریشه، وزن خشک شاخساره و ریشه و نیز مقدار پرولین، قندهای محلول، کلروفیل کل و کاروتنوئیدها با روش‌های استاندارد اندازه‌گیری و به‌صورت میانگین هر بوته محاسبه شد.

ارتفاع گیاه از سطح خاک تا انتهای ساقه و نیز طول ریشه‌ها به‌وسیله خط‌کش، حجم ریشه از طریق جابجایی آب در یک استوانه مدرج و وزن خشک شاخساره و ریشه، خشک شده در آون با دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت با ترازو تعیین شد.

برای تعیین قندهای محلول، ۰/۵ گرم نمونه خشک گیاهی با ۱/۵ میلی‌لیتر اتانول ۸۰ درصد به مدت ۶۰ دقیقه در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری و بعد نمونه‌ها سانتریفیوژ شدند. ۱۰ میکرولیتر از نمونه فاز مایع را در یک فالکون ریخته و به آن ۲۵۰ میکرولیتر محلول ۰/۵درصد فنول و ۱۲۵۰ میکرولیتر اسیدسولفوریک ۹۸ درصد اضافه شد. بعد بوسیله اسپکتروفتومتر، میزان جذب نوری در طول‌موج ۴۸۵ نانومتر قرائت و به کمک منحنی استاندارد، مقدار قندهای محلول تعیین شد (کوچرت، ۱۹۷۸).

جهت تعیین پرولین، ۰/۵ گرم از پودر خشک شده را با ۱۰ میلی‌لیتر سولفوسالیسیلیک سه درصد به مدت ۴۸ ساعت در دمای پایین نگهداری و بعد از صاف کردن، یک میلی‌لیتر از محلول را با یک میلی‌لیتر ناین هیدرین و یک میلی‌لیتر اسید استیک ترکیب گردید. بعد از یک ساعت نگهداری در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بن ماری، دو میلی‌لیتر تولوئن به هر نمونه اضافه و سپس شدت جذب نوری در طول‌موج ۵۲۰ نانومتر قرائت شد. در آخر، از روی منحنی استاندارد مربوطه، مقدار پرولین تعیین شد (بتس و همکاران، ۱۹۹۴).

همچنین، رنگیزه‌های گیاهی (مقادیر کلروفیل‌های a و b و کاروتنوئید) با استفاده از روش لیچنتالر و ولبورن (۱۹۸۳) اندازه‌گیری شدند. بر این اساس، به ۲۵ میلی‌گرم پودر گیاهی، دو میلی‌لیتر اتانول ۹۶٪ در تاریکی اضافه شد و به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ گردید. مایع رویی هر نمونه درون پلیت ریخته و توسط دستگاه الایزا در طول موج‌های ۶۶۳، ۶۴۶، و ۴۷۰ نانومتر قرائت صورت گرفت. بعد با استفاده از روابط مربوطه، مقادیر رنگیزه‌های گیاهی محاسبه شدند.

برای تعیین غلظت سرب، ۰/۵گرم پودر خشک گیاهی را (با یک کروزه چینی) در کوره الکتریکی قرار داده و دمای کوره به‌تدریج به ۵۵۰ درجه سلسیوس رسانده شد. پس از ۶ ساعت، ۲/۵ میلی‌لیتر اسید کلریدریک ۲ مولار به خاکستر حاصل افزوده و سپس محتویات در یک بالن ژوژه ۲۵ میلی‌لیتری جمع‌آوری شده و با آب مقطر بـه حجم رسانیده شد (کلوت، ۱۹۸۶). غلظت سرب عصاره توسط دستگاه جذب اتمی (مدل SpectrAA-220 FS شرکت Varian) تعیین شد. حد تشخیص اندازه‌گیری سرب در این دستگاه ۰۱/. $mg\ L^{-1}$ بود. مواد شیمیایی مورد استفاده در این تحقیق از شرکت مرک آلمان خریداری شد. کالیبراسیون طیف‌سنج جذب اتمی با استفاده از محلول‌های استاندارد با غلظت مشخص انجام گردید. ظروف شیشه‌ای با اسیدشویی تمیز شدند. کلیه اندازه‌گیری‌ها و آزمایشات در این تحقیق در دو تکرار انجام شد. آنالیز داده ها با نرم افزار آماری SPSS-16 و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد انجام شد.

## نتایج و بحث

### ویژگی‌های فیتوشیمیایی بادرنجبویه

مطابق نتایج تجزیه واریانس، اثرهای اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک بر برخی ویژگی‌های فیتوشیمیایی بادرنجبویه تحت تنش سرب شامل پرولین، قندهای محلول، کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئیدها (در سطح یک درصد) و بر غلظت سرب شاخساره (در سطح پنج درصد) معنی‌دار شد (جدول ۲).

**جدول ۲- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثرهای اسید آسپارتیک، اسید گلوتامیک و اثر متقابل آن‌ها بر ویژگی‌های فیتوشیمیایی بادرنجبویه تحت تنش سرب**

| منابع تغییرات | درجه آزادی | غلظت سرب (mg kg$^{-1}$) | پرولین (µmol g$^{-1}$) | قند محلول (mg g$^{-1}$) | کلروفیل a (mg g$^{-1}$) | کلروفیل b (mg g$^{-1}$) | کاروتنوئیدها (mg g$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| سرب | 2 | 0.51** | 1.37** | 0.127** | 504** | 238** | 205** |
| اسید آسپارتیک | 2 | 2.25** | 8.35** | 0.58** | 46** | 35** | 38** |
| سرب × اسید آسپارتیک | 4 | 0.007* | 0.11** | 0.005** | 3.3** | 0.56ns | 0.18* |
| اسید گلوتامیک | 2 | 14** | 79.1** | 14** | 7.7** | 124** | 109** |
| سرب×اسید گلوتامیک | 4 | 0.011** | 0.06** | 0.004** | 1.05** | 4.2** | 4.7** |
| اسید گلوتامیک×اسید آسپارتیک | 4 | 0.328** | 0.01* | 0.102** | 1.6** | 1.8** | 1.5** |
| سرب×اسید آسپارتیک×اسید گلوتامیک | 8 | 0.005* | 0.06** | 0.004** | 0.6** | 3.5** | 2.3** |
| خطا | 54 | 0.002 | 0.003 | 0.001 | 0.131 | 0.263 | 0.05 |
| ضریب تغییرات (٪) | | 1.8 | 1.03 | 1.98 | 4.65 | 7.15 | 4.03 |

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌داربودن در سطح پنج و یک درصد را نشان می‌دهد.

## غلظت سرب شاخساره

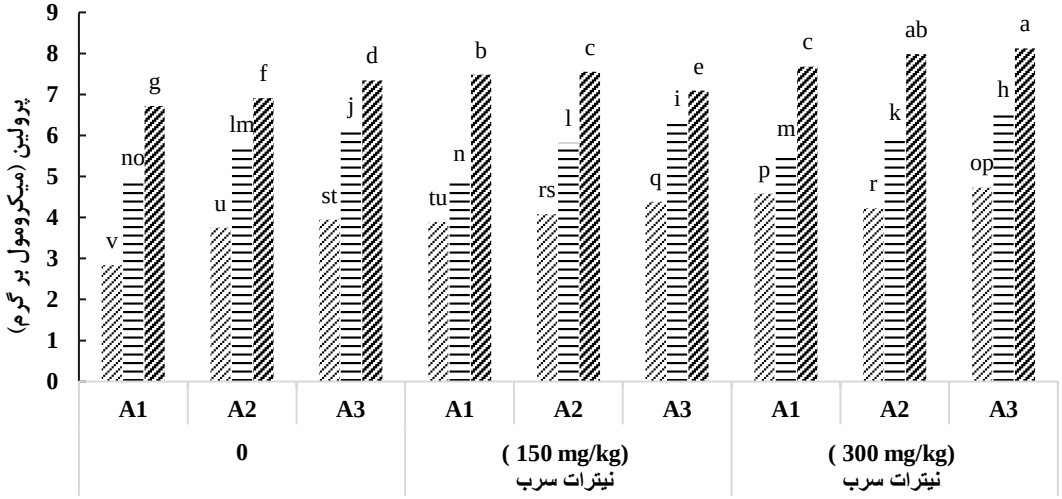
نتایج مقایسه میانگین اثرهای سرب، اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک بر غلظت سرب شاخساره بادرنجبویه نشان داد که، بیشترین غلظت سرب (۸/۵۴ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک) در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سرب و بدون کاربرد اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک به‌دست آمد. به‌عبارت دیگر، این موضوع بیانگر رابطه مستقیم بین مقدار سرب در ریزوسفر و میزان جذب آن توسط ریشه است. کمترین غلظت سرب (۴/۳۲ میلی-گرم در کیلوگرم) نیز در تیمار ۲۰۰ میلی‌مولار اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک و بدون کاربرد سرب به‌دست آمد. به‌عبارتی، با کاربرد این دو اسید آمینه، غلظت سرب در اندام‌های هوایی گیاه به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. مکانیسم این رخداد به‌خوبی روشن نیست، اما با توجه به اینکه سرب پس از ورود به گیاه، در ریشه‌ها انباشته می‌شود، ممکن است این عوامل کلات‌کننده سبب اختلال در انتقال سرب از ریشه به برگ‌های گیاه گردند.

گزارش شده است که انباشته‌شدن و تجمع سرب در ریشه، نوعی ساز و کار تحمل گیاهان در برابر سمیت این عنصر است. در واقع ریشه به‌عنوان یک مانع در فرایند انتقال سرب به اندام‌های هوایی عمل می‌کند و تنها زمانی که غلظت سرب در محیط زیاد باشد انتقال آن به بخش‌های هوایی گیاه صورت می‌گیرد (حسین و همکاران، ۲۰۱۷). به‌عبارت دیگر، بخش اعظم سرب جذب شده به‌صورت پیروفسفات در طول دیواره سلولی ریشه باقی مانده و این امر نیز می-تواند از علل تجمع سرب در ریشه و کاهش غلظت آن در شاخساره گیاه باشد (خان و همکاران، ۲۰۱۶).

## غلظت پرولین

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که، بیشترین غلظت پرولین (۸/۱۲ میکرومول بر گرم) بخش هوایی گیاه بادرنجبویه در شرایط تنش شدید سرب (تیمار ۳۰۰ میلی-گرم در کیلوگرم سرب) و بدون اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک، به‌دست آمد. به‌عبارتی، این تیمار نسبت به تیمار شاهد (بدون کاربرد سرب و عوامل کلات‌کننده) افزایش ۳۲۰ درصدی در غلظت پرولین را نشان می‌دهد. سرب

دارای آثار مخرب بر رشد و عملکرد گیاهان از طریق اختلال در فعالیت‌های متابولیکی است. اما مهم‌ترین اثر تخریبی سرب، القاء تنش‌های اکسیداتیو است که باعث تولید رادیکال‌های فعال اکسیژن می‌شود (نیازی، ۲۰۱۸). گیاهان برای مقابله با این رادیکال‌های آزاد، از پرولین به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدان غیرآنزیمی استفاده می‌کنند. به‌عبارتی، تولید پرولین که از گلوتامات ایجاد می‌شود از اقدامات مهم سیستم دفاعی گیاهان در زمان بروز تنش‌های محیطی و از جمله تنش سرب است (خان و همکاران، ۲۰۱۶). به‌عبارت دیگر، با افزایش تولید و تجمع پرولین در سیتوپلاسم سلولی، این اسید آمینه از فعالیت‌های آنزیمی محافظت کرده و تحمل گیاه در برابر تنش افزایش می‌یابد. بطورکلی، نقش پرولین در افزایش تحمل در گیاهان در شرایط تنش سرب، از طریق مکانیزم‌هایی مثل حفاظت آنزیمی، پایداری و بقاء پروتئین، تنظیم اسیدیته سلول و جمع‌آوری رادیکال‌های آزاد است (مهدویان و همکاران، ۲۰۱۶). همچنین، اسید آمینه پرولین در درون سلول‌های گیاهی نقش اسمولالیتی داشته و موجب حفظ تعادل اسمزی واکوئل می‌گردد. همین‌طور، گیاهان با تولید و تجمع پرولین، باعث افزایش فعالیت پروتئین‌سازی شده تا از این راه در برابر تنش مقاومت کند (کشته‌گر و همکاران، ۱۳۹۳).




**شکل ۱- مقایسه میانگین اثرهای متقابل سرب، اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک بر پرولین بادرنجبویه**

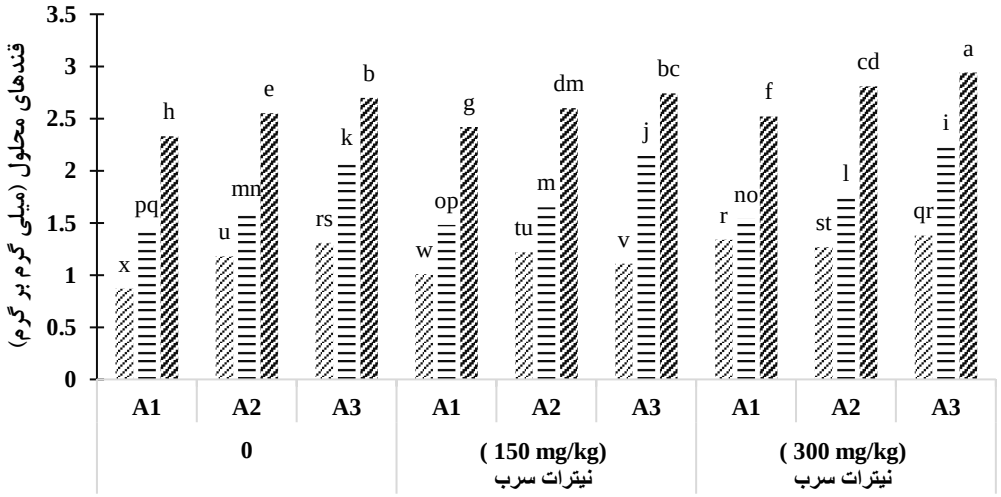
$A_1$, $A_2$ و $A_3$ به ترتیب کاربرد اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک در سطوح ۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار را نشان می‌دهند.

کمترین مقدار پرولین (۲/۸۴ میکرومول بر گرم) نیز در شرایط کاربرد ۲۰۰ میلی‌مولار اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک و بدون سرب حاصل شد. به‌عبارتی، محلول‌پاشی گیاهان با این دو اسید آمینه سبب کاهش غلظت پرولین شد. گزارش شده است که کاربرد اسید آسپارتیک می‌تواند به‌عنوان تنظیم‌کننده سیستم آنتی‌اکسیدان غیرآنزیمی عمل کرده و با کاهش گونه‌های اکسیژن واکنش‌پذیر (ROS)، موجب کاهش تولید پرولین می‌شود. همچنین، اسید آمینه آسپارتیک از طریق تنظیم اسموتیک، موجب افزایش تحمل گیاهان در برابر تنش و کاهش تولید اسید آمینه پرولین می‌گردد (مسعودی و همکاران، ۲۰۲۰).

## قندهای محلول

با توجه به نتایج مقایسه میانگین، بیشترین مقدار قند محلول (۲/۹۴ میلی‌گرم بر گرم ماده خشک) در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سرب و عدم کاربرد اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک به‌دست آمد که نسبت به تیمار شاهد (بدون کاربرد سرب و عوامل کلات‌کننده) افزایش ۲۸۵ درصد را نشان می‌دهد. یکی از پاسخ‌های عمومی گیاهان نسبت به تنش‌های محیطی، افزایش تولید و تجمع

قندهای محلول در سیتوپلاسم سلول‌های گیاهی است. قند-های محلول موادی با وزن مولکولی کم بوده که به هنگام وقوع تنش‌های محیطی، به‌عنوان اسمولیت عمل کرده و با کاهش پتانسیل آبی، باعث تنظیم تعادل اسمزی، حفظ تورژسانس سلولی و افزایش شیب جریان آب به‌سمت سلول‌های گیاهی می‌شوند (گوریر و همکاران، ۲۰۲۰). به-طورکلی، علل افزایش غلظت قندهای محلول در شرایط تنش، کاهش انتقال قندها در سیستم آوندی و به دنبال آن کاهش مصرف قند در اندام‌های مصرف‌کننده، افزایش نسبت ساکارز به نشاسته و یا تجزیه نشاسته به کمک آنزیم آمیلاز می‌باشد (کوکال و همکاران، ۲۰۰۸).




**شکل ۲- مقایسه میانگین اثرهای متقابل سرب، اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک بر قندهای محلول بادرنجبویه**

$A_1$, $A_2$ و $A_3$ به ترتیب کاربرد اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک در سطوح ۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار را نشان می‌دهند.

کمترین مقدار قندهای محلول (۰/۸۷ میلی‌گرم بر گرم) در تیمار ۲۰۰ میلی‌مولار اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک و بدون سرب به‌دست آمد. به‌عبارت دیگر، کاربرد اسیدهای آمینه آسپارتیک و گلوتامیک، حتی در شرایط تنش سرب، سبب کاهش قندهای محلول شدند. از آنجا که تولید اسید-های آمینه در سیتوپلاسم سلولی، تحمل گیاه در برابر تنش محیطی را افزایش می‌دهد، در واقع، جذب و تجمع اسیدهای آمینه در سلول‌های گیاهی نقش اسمولیتی داشته و موجب تعادل اسمزی می‌گردند (کاظم‌پور و همکاران، ۱۴۰۲). بنابراین، با تنظیم اسمزی و یا کاهش پتانسیل آبی، تجزیه نشاسته و در ادامه، تولید و تجمع قندهای محلول در سیتوپلاسم سلول‌های گیاهی کاهش می‌یابد.

همین‌طور، گیاهان با جذب یا تولید اسیدهای آمینه و از جمله آسپارتیک و گلوتامیک، باعث افزایش فعالیت پروتئین‌سازی شده تا از این راه در برابر تنش مقاومت کنند. این موضوع نیز می‌تواند بیانگر تأثیر مثبت این دو اسید آمینه در کاهش قند محلول در شرایط تنش باشد (مسعودی و همکاران، ۲۰۲۰).

## کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئیدها

نتایج مقایسه میانگین اثرهای اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک بر مقدار رنگیزه‌های گیاهی بادرنجبویه تحت تنش سرب نشان داد که، کمترین مقادیر کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئیدها (به‌ترتیب ۲/۰۲ ،

۱/۹۵، ۱/۰۸ میلی‌گرم بر گرم) در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سرب و بدون اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک به‌دست آمد. جذب فلزات سنگین مانند سرب و انتقال آن به اندام هوایی، سبب ایجاد تغییرات فیزیولوژیک در سلول-های برگ می‌شود. از بارزترین این تغییرات، زرد شدن یا چروکیدگی برگ است. سرب بر عملکرد فتوسیستم یک و دو تأثیر گذاشته و با تخریب پروتئین‌های گیرنده پروتون در فتوسیستم دو، ظرفیت گرفتن پروتون و بازده فتوسنتز را کاهش می‌دهد (صوفی و همکاران، ۲۰۲۰). همچنین، علت کاهش کلروفیل a و b و کاروتنوئیدها تحت تأثیر تنش سرب ممکن است به‌دلیل کاهش عملکرد آنزیم‌های مسئول بیوسنتز کلروفیل، کاهش جذب آهن و منیزیم و یا برهم-کنش سرب با یون منگنز و مهار انتقال الکترون در زنجیره انتقال آن باشد (ژو و همکاران، ۲۰۱۸). جانشینی سرب به‌جای منیزیم در ساختار مولکول کلروفیل و نیز افزایش فعالیت آنزیم کلروفیلاز، مسئول تجزیه کلروفیل، نیز از دیگر علل کاهش مقدار رنگیزه‌های گیاهی تحت تنش سرب می‌باشد (حسین و همکاران، ۲۰۱۷).

بیشترین مقادیر کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئید (به ترتیب ۱۶/۵۳ ، ۱۲/۳، ۱۰/۵۵ میلی‌گرم بر گرم) با کاربرد ۲۰۰ میلی‌مولار اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک و بدون سرب به‌دست آمد. البته با کاربرد اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک، مقادیر رنگیزه‌های گیاهی، حتی در شرایط سمیت سرب افزایش معنی‌داری یافت. بطورکلی، گیاهان قادرند از اسیدهای آمینه (مثل اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک)، به‌عنوان منبع نیتروژن استفاده کنند. نیتروژن نیز علاوه بر شرکت در ساختار پروتئین‌ها، بخشی از مولکول کلروفیل را تشکیل می‌دهد (لیو و همکاران، ۲۰۲۰). از طرف دیگر، اسیدهای آمینه‌ها با قرارگیری بر روی سلول-های برگ (مثلاً از طریق محلول‌پاشی)، تحریک‌کننده رشد و فعالیت‌های متابولیکی گیاه بوده و از این طریق می‌توانند منجر به افزایش فتوسنتز شوند (کاظم‌پور و همکاران، ۱۴۰۲).

## اثرهای اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک بر ویژگی‌های مورفولوژیک بخش هوایی بادرنجبویه تحت تنش سرب

نتایج تجزیه واریانس اثرهای اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک بر ویژگی‌های مورفولوژیکی بخش هوایی بادرنجبویه تحت تنش سرب نشان داد که، اثرهای متقابل تیمارها بر وزن خشک شاخساره و ارتفاع گیاه (در سطح یک درصد) و تعداد برگ (در سطح پنج درصد) معنی‌دار شده است (جدول ۳).

**جدول ۳- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثرهای اسید آسپارتیک، اسید گلوتامیک و اثر متقابل آن‌ها بر ویژگی‌های مورفولوژیک بادرنجبویه تحت تنش سرب**

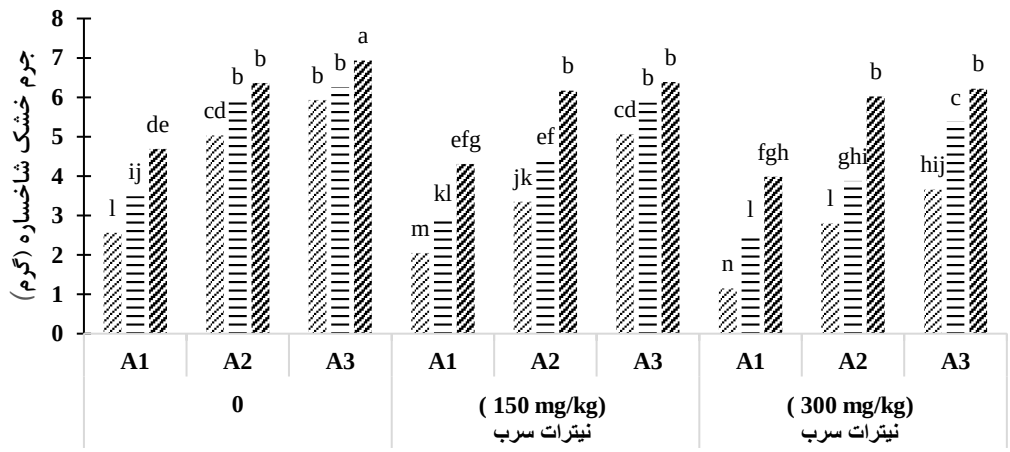
| منابع تغییرات | درجه آزادی | وزن خشک شاخساره | ارتفاع گیاه | تعداد برگ |
|---|---|---|---|---|
| سرب | 2 | 11** | 43** | 0.051** |
| اسید آسپارتیک | 2 | 50** | 146** | 2.25** |
| سرب × اسید آسپارتیک | 4 | 0.306** | 0.82** | 0.007* |
| اسید گلوتامیک | 2 | 31** | 113** | 14** |
| سرب×اسید گلوتامیک | 4 | 1.08** | 0.605** | 0.011** |
| اسید گلوتامیک×اسید آسپارتیک | 4 | 0.599** | 1.37** | 0.328** |
| سرب×اسید آسپارتیک×اسید گلوتامیک | 8 | 0.262** | 1.37** | 0.005* |
| خطا | 54 | 0.043 | 0.601 | 0.002 |
| ضریب تغییرات (٪) | | 4.56 | 1.25 | 1.8 |

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌داربودن در سطح پنج و یک درصد را نشان می‌دهد.

## وزن خشک شاخساره

نتایج مقایسه میانگین داد که، بیشترین وزن خشک شاخساره (۶/۹۳ گرم در بوته) با کاربرد ۲۰۰ میلی-مولار اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک و بدون سرب حاصل شد. این دو اسید آمینه پیش‌ساز یا فعال‌کننده فیتوهورمون‌ها و عوامل رشدی گیاه بوده و با تأثیر بر بیوسنتز جیبرلین، موجب رشد و متابولیسم گیاهی و افزایش وزن خشک گیاه می‌شوند (جهانی و همکاران، ۱۳۹۶).

کمترین وزن خشک شاخساره بادرنجبویه (۱/۱ گرم در بوته) نیز در شرایط تنش شدید سرب (۳۰۰ میلی-گرم در کیلوگرم سرب) و بدون کاربرد اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک به‌دست آمد. بطورکلی، از اولین پاسخ‌های گیاهان نسبت به عوامل تنش‌زای محیطی، کاهش ویژگی-های موفولوژیک گیاه است. به‌عبارت دیگر، سرب با کاهش فتوسنتز و جذب عناصر غذایی و یا اختلال در تعادل آبی، سبب کاهش پارامترهای رشدی و از جمله کاهش وزن خشک اندام‌های هوایی می‌گردد (حسین و همکاران، ۲۰۱۷). همچنین، از آثار غیرمستقیم سمیت سرب در گیاهان، ایجاد اختلال در تغذیه معدنی گیاه است. به عبارت دیگر، سرب موجب کاهش جذب برخی عناصر ضروری مانند آهن و منیزیم و در نتیجه کاهش میزان فتوسنتز می‌شود (ذوالفقار و همکاران، ۲۰۱۹). اسیمیلاسیون خالص $CO_2$ از طریق فرایند فتوسنتز، اولین مرحله تولید زیست‌توده است. این به معنای تبدیل $CO_2$ به مولکول‌های آلی چون قندها و نشاسته است.




**شکل ۳- مقایسه میانگین اثرهای متقابل سرب، اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک بر جرم خشک شاخساره بادرنجبویه**

**ارتفاع گیاه**

بیشترین ارتفاع گیاه (۲۵/۱ سانتی‌متر) در تیمار ۲۰۰ میلی-مولار اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک و بدون سرب به-دست آمد. یعنی محلول‌پاشی گیاه بادرنجبویه با تیمارهای اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک موجب افزایش ارتفاع گیاه، حتی در شرایط سمیت سرب شد. این امر به‌دلیل سنتز و تولید بیشتر پروتئین در گیاه بوده که به‌دنبال آن، رشد عمومی و از جمله ارتفاع گیاه بیشتر می‌شود (جهانی و همکاران، ۱۳۹۶). همچنین، وجود نیتروژن در ساختار این دو اسید آمینه، نقش مهمی در افزایش ساخت اسیدهای نوکلئیک و آمیدهای موثر در فرایند تکثیر سلولی دارد (لیو و همکاران، ۲۰۲۰).

همچنین، نتایج نشان داد که، کمترین ارتفاع گیاه (۱۴/۸ سانتی‌متر) در تیمار۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سرب و عدم کاربرد اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک به‌دست آمد. فلزات سنگین و از جمله سرب با جلوگیری از تقسیم سلولی، افزایش پراکسیداسیون لیپیدها و یا کاهش سنتز کلروفیل، باعث کاهش رشد طولی گیاهان می‌شوند (کشته-گر و همکاران، ۱۳۹۳). به‌عبارتی، فلزات سنگین با تأثیر بر دیواره سلولی و تیغه میانی و سپس افزایش پیوند عرضی بین ترکیبات دیواره سلولی، باعث کاهش تقسیم سلولی می‌شوند (کومار و همکاران، ۲۰۱۹).

همینطور، گزارش شده است که سرب به‌دلیل تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن، از قبیل سوپراکسید، هیدروژن پراکسید و هیدروکسیل، موجب اختلال در فرایندهای متابولیکی و به‌دنبال آن کاهش جذب عناصر غذایی ضروری مثل پتاسیم، آهن و روی شده و از این طریق باعث کاهش رشد عمومی و ارتفاع گیاه می‌شوند (ژو و همکاران، ۲۰۱۸).

## تعداد برگ

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که، کمترین تعداد برگ (۸۲ برگ در بوته) در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سرب و بدون کاربرد اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک به‌دست آمد. جذب و سمیت سرب در گیاهان می‌تواند موجب کاهش جذب عناصر غذایی ضروری، کاهش فتوسنتز و رشد برگ‌ها شود. همین‌طور، فلزات سنگین با کاهش تورژسانس سلولی، باعث کاهش تقسیم و رشد سلولی می‌شوند. به‌عبارتی، تجمع این فلزات در دیواره سلولی یا ورود به سیتوپلاسم، سبب اختلال در متابولیسم طبیعی سلول و در نهایت کاهش رشد و یا ریزش برگ می‌شوند (نیازی، ۲۰۱۸).

بیشترین تعداد برگ (۱۴۱ برگ در بوته) نیز در تیمار ۲۰۰ میلی‌مولار اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک و بدون سرب حاصل شد. محلول‌پاشی گیاه با تیمارهای اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک موجب افزایش نیتروژن گیاه و مصرف آن برای ساخت پروتئین و تولید متابولیت‌های ثانویه گردیده و همین‌طور، با افزایش سطح کربن‌گیری و سنتز

مواد هیدروکربنه، رشد و تکثیر سلولی و تعداد برگ گیاه بیشتر می‌شود (جهانی و همکاران، ۱۳۹۶).

## اثرهای اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک بر ویژگی‌های رشدی ریشه بادرنجبویه تحت تنش سرب

بر طبق نتایج تجزیه واریانس، اثرهای اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک بر ویژگی‌های مورفولوژیکی بادرنجبویه تحت تنش سرب، اثرهای متقابل تیمارها بر طول و حجم ریشه (در سطح یک درصد) و بر وزن خشک آن (در سطح پنج درصد) معنی‌دار شده است (جدول ۴).

**جدول ۴- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثرهای اسید آسپارتیک، اسید گلوتامیک و اثر متقابل آن‌ها بر ویژگی‌های ریشه بادرنجبویه تحت تنش سرب**

| منابع تغییرات | درجه آزادی | وزن خشک ریشه | طول ریشه | حجم ریشه |
|---|---|---|---|---|
| سرب | 2 | 0.496** | 45.03** | 504** |
| اسید آسپارتیک | 2 | 2.2** | 118** | 46** |
| سرب × اسید آسپارتیک | 4 | 0.006* | 0.39** | 3.3** |
| اسید گلوتامیک | 2 | 13** | 87.1** | 7.7** |
| سرب×اسید گلوتامیک | 4 | 0.009** | 0.8** | 1.05** |
| اسید گلوتامیک×اسید آسپارتیک | 4 | 0.332** | 3.12** | 1.6** |
| سرب×اسید آسپارتیک×اسید گلوتامیک | 8 | 0.005* | 0.31** | 0.6** |
| خطا | 54 | 0.002 | 0.05 | 0.131 |
| ضریب تغییرات (٪) | | 2.94 | 3.02 | 4.65 |

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌داربودن در سطح پنج و یک درصد را نشان می‌دهد.

### طول، حجم و وزن خشک ریشه

نتایج مقایسه میانگین اثرهای اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک بر ویژگی‌های ریشه بادرنجبویه تحت تنش سرب نشان می‌دهد که، کمترین مقادیر وزن خشک، طول و حجم ریشه (به ترتیب ۱/۱ گرم، ۴/۸ سانتی‌متر و ۲۱/۳ سانتی‌مترمکعب) در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سرب و بدون کاربرد اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک به‌دست آمد به‌عبارتی، نسبت به سطح ۱۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سرب و عدم کاربرد این دو اسید آمینه، برای وزن خشک ریشه ۷۲/۲ درصد، طول ریشه ۳۶/۱۳ درصد و حجم ریشه ۱۴/۵۶ درصد کاهش نشان می‌دهد.

عناصر سنگین از عوامل اصلی محدودکننده رشد و توسعه ریشه در خاک محسوب شده که البته، کاهش رشد سایر بخش‌های گیاه را نیز در بر می‌گیرد. به‌عبارتی، عدم رشد و گسترش سیستم ریشه تحت تأثیر تنش سرب، باعث کاهش سطوح‌جذب‌کننده آب و مواد غذایی می‌شود.

بنابراین، سرب با تجمع در دیواره سلولی ریشه، باعث لیگنینی شدن دیواره سلولی و کاهش قابلیت ارتجاعی و نفوذپذیری آن و در ادامه، کاهش جذب آب و عناصر از خاک و رشد طولی ریشه می‌شود (هانگ و همکاران، ۲۰۱۹).

بیشترین مقادیر وزن خشک، طول و حجم ریشه (به ترتیب برابر ۲/۴۸ گرم، ۱۳/۳۸ سانتی‌متر و ۳۲/۱۳ سانتی‌متر مکعب) در شرایط کاربرد ۲۰۰ میلی‌مولار اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک (بالاترین سطوح کاربردی) و بدون سرب حاصل گردید. البته تنش سرب در سطوح ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم (با همان سطوح اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک یعنی ۲۰۰ میلی‌مولار)، موجب کاهش وزن خشک ریشه به مقدار ۲۵/۲ و ۳۱/۱ درصد، طول ریشه ۱۷/۶ و ۳۹/۶ درصد و برای حجم ریشه ۶/۷ و۱۳/۴ درصد شد.

اثرهای اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک در افزایش صفات رشدی ریشه می‌تواند به‌دلیل نقش این اسیدهای آمینه در سنتز پروتئین‌های حیاتی گیاه باشد که خود رشد و نمو بخش‌های مختلف و از جمله طول و حجم ریشه را موجب می‌شوند (کاظم‌پور و همکاران، ۱۴۰۲). علت دیگر افزایش صفات ریشه، ممکن است به‌واسطه ساختار نیتروژنی اسیدهای آمینه باشد که زمینه جذب بیشتر سایر عناصر غذایی را فراهم می‌کنند (صبوری و همکاران، ۲۰۱۴).

## نتیجه‌گیری

بطورکلی، نتایج بیانگر اثر سرب، به‌عنوان یک فلز سنگین مهم در کاهش ویژگی‌های رشدی گیاه مثل ارتفاع، وزن خشک شاخساره و ریشه، تعداد برگ، طول و حجم ریشه و نیز ایجاد یک‌سری تغییرات فیزیولوژیکی در گیاه مثل افزایش پرولین و قندهای محلول و کاستن رنگیزه‌های گیاهی در بادرنجبویه است. در مقابل، کاربرد اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک به‌صورت اسپری برگی موجب افزایش ویژگی های رشدی گیاه گردید. به‌عبارت دیگر، استفاده از این دو اسید آمینه توانست به‌طور قابل ملاحظه-ای، اثرهای مضر سرب بر ویژگی‌های رشدی گیاه را کاهش دهد. بنابراین، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که کاربرد این عوامل کلات‌کننده یک راه حل مناسب برای کاهش اثر تنش سرب در گیاه بادرنجبویه است.

## فهرست منابع


۱. جهانی، رحیمه؛ حسنی، عباس و صمدی، عباس (۱۳۹۶). تأثیر محلول‌پاشی اوره، اسید آسپارتیک و اسید گلوتامیک بر ویژگی‌های رشدی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه آگاستاکه (*Agastache foeniculum*). *تحقیقات کاربردی خاک*، ۵(۲)، ۹۵-۱۰۷.

۲. غفاری‌نژاد، سیدعلی؛ نورقلی‌پور، فریدون و غیبی، محمدنبی (۱۳۹۹). محرک‌های رشد گیاهی، نقش آن‌ها در فیزیولوژی گیاه، جذب عناصر غذایی و مقابله با تنش‌های محیطی. *نشریه مدیریت اراضی*، ۸ (۱)، ۴۸-۶۷.

۳. قربانلی، مه‌لقا و کیاپور، عادله (۱۳۹۳). اثرات غلظت های مختلف سرب و مس بر مقدار مالون-دآلدهید، پرولین و فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز و کاتالاز در گیاه دارویی خرفه (*Portulaca oleracea L.*). *تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران*. ۳۰(۱)، ۶۸-۸۳.

۴. کاظم‌پور، علی؛ شرقی، یونس؛ مدرس‌ثانوی، سیدعلی‌محمد؛ زاهدی، حسین و سفیدکن، فاطمه (۱۴۰۲). اثر محلول‌پاشی اسیدهای آمینه بر خصوصیات مورفوفیزیولوژیک و اسانس آویشن دنایی تحت رژیم‌های مختلف آبیاری. *فرآیند و کارکرد گیاهی*، ۱۲(۵۳)، ۷۱-۹۰.

۵. کشته‌گر، مهدی؛ صفی‌پور افشار، اکبر و نعمت‌پور، فاطمه سعید (۱۳۹۳). اثر فلزات سنگین مس و سرب بر برخی صفات رشدی، میزان پرولین و پراکسیداسیون لیپیدی در دو رقم ماش. *اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی*، ۸(۳۱)، ۳۶۳-۳۷۴.

۶. کوچکی، علیرضا؛ نصیری محلاتی، مهدی و نجفی، فرزاد (۱۳۸۳).تنوع زیستی گیاهان دارویی و معطّر در بوم نظام‌های زراعی ایران. *مجله پژوهشهای زراعی ایران*، ۲(۲)، ۲۰۸-۲۱۵.

7. Abdelkader, S. M., Elkhishin, I. A., Mesallam, D., and Abdelwahab, M. (2023). Lemongrass (*Cymbopogon Citratus*): Health beneficial perspective. *European Chemical News*, 12(1), 3422-3426.
8. Bates, L. S., Waldren, R. P., and Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant and Soil*, 29, 205-207.
9. Gurrieri, L., Merico, M., Trost, P., Forlani, G., and Sparla, F. (2020). Impact of drought on soluble sugars and free proline content in selected arabidopsis mutants. *Biology*, 9 (11), 367. https://doi.org/10.3390/biology9110367
10. Huang, X., luo, D., Chen, x., Wei, L., Liu, Y., Wu, Q., Xiao, T., Mai, X., Liu, G., and Liu, L., (2019). Insights in to heavy metals leakage in chelator-induced phytoextraction of Pb-and Ti contaminated soil. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(8), 1328. https://doi.org/10.3390/ijerph16081328
11. Hussain, I., Siddique, A., Ashraf, M., Rasheed, R., Ibrahim, M., Iqbal, M., Akbar, S., and Imran, M. (2017). Does exogenous application of ascorbic acid modulate growth, photosynthetic pigments and oxidative defense in okra (*Abelmos chusesculentus* L.) under lead stress? *Acta Physiologiae Plantarum*, 39, 144. https://doi.org/:10.1007/s11738-017-2439-0
12. Khan, I.., Iqbal, M., Ashraf, M. Y., Ashraf, M. A., and Ali, S. (2016). Organic chelats-mediated enhanced lead (Pb) uptake and accumulation is associated with higher activity of enzymatic antioxidants in spinach (*Spinace aoleracea* L.). *Journal of Hazardous Materials*, 317, 352-361. https://doi.org/:10.1016/j.jhazmat.2016.06.007
13. Klute, A. (1986). *Methods of soil analysis: Part 1 and 2, Physical and chemical methods*. 2nd Edition, American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, Madison, Wis., USA. ISBN: 9780891180883, 0891180885
14. Kocal, N., Sonnewald, U., and Sonnewald, S. (2008). Cell wall-bound invertase limits sucrose export and is involved in symptom development and inhibition of photosynthesis during compatible interaction in tomato. *Plant Physiology*, 148, 1523-36. https://doi.org/10.1104/pp.108.127977
15. Kochert, G. (1978). *Carbohydrate determination by the phenol sulfuric acid method*. In: Hellebust, J.A., & Craigie, J.S., (Ed) Handbook of Phycological Methods, Physiological and Biochemical Methods. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 95-97
16. Kumar, V., Sing H. J., and Kumar, P. (2019). Heavy metals, accumulation in crop plants: sources, response mechanisms, stress tolerance and their effects. 38-57. In: *Contaminants in Agriculture and Environment: Health Risks and Remediation*, Chapter: 4. Publisher: Agro Environ Media, Haridwar, India. https://doi.org/10.26832/AESA-2019-CAE-0161-04

17. Lichtenthaler, H. K., and Wellburn, A. R. (1983). Determination of total carotenoids and chlorophyll a and b of leaf extract in different solvents. *Biochemical Society Transactions*, 11, 591–592. https://doi.org/10.1042/bst0110591
18. Liu, L., Luo, D., Yao, G., Huang, X., Wei, L., Liu, Y., Wu, Q., Mai., X., Liu, G., and Xiao, T. (2020). Comparative activation process of Pb, Cd and Tl using chelating agents from contaminated red soils. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17 (2), 497. https://doi.org/10.3390/ijerph17020497
19. Mahdavian, K., Ghaderian, S. M., and Schat, H. (2016). Pb accumulation, tolerance, antioxidants, thiols, and organic acids in metallicolous and non-metallicolous *Peganum harmala* under Pb exposure. *Environmental and Experimental Botany*, 126, 21-31. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.01.010
20. Masoudi, F., Shirvani, M., Shariatmadari, H., and Sabzalian, M. R. (2020). Performance of new biodegradable chelates in enhancing phytoremediation of heavy metals from acontaminated calcareous soil, *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 18, 655-664. https://doi.org/10.1007/s40201-020-00491-y
21. Mousavi, S. M., Brodie, G., Payghamzadeh, K., Raiesi, T., and Strivastava, A. K. (2022). Lead bioavailability in the environment: Its exposure and and effects. *Journal of Advances in Environmental Health Research*, 10(1), 1-14. https://doi.org/10.32598/JAEHR.10.1.1256
22. Mousavi, S. M., Motesharezadeh, B., Hosseini, H. M., Alikhani, H., and Zolfaghari, A. A. (2018). Root-induced changes of Zn and Pb dynamics in the rhizosphere of sunflower with different plant growth promoting treatments in a heavily contaminated soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 147, 206-216. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.08.045
23. Niazy, M. M. (2018). Role of biochar di-ammonium phosphate and aspartic acid on lead uptake in lettuce (*Lactuca satival* L.) under lead stress, *Egpyt Journal of Applied Science*, (1) 33,1-16.
24. Saburi, M., Haj Seyed Hadi, M., and Taghi Darzi, M. (2014). Effects of amino acids and nitrogen fixing bacteria on quantitative yield and essential oil content of basil (*Ocimum basilicum*). *Agriculture Science Developments*, 3 (8), 265-268.
25. Shafie, F., Bayat, H., Aminifard, M. H. and Daghighi, S. (2021). Biostimulant effects of seaweed extract and amino acids on growth, antioxidants, and nutrient content of yarrow (*Achillea millefolium* L.) in the field and greenhouse conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 52, 964-975. https://doi.org/:10.1080/00103624.2021.1872596
26. Sofy, M. R., Seleiman, M. F., Alhammad, B. A., Alharbi, B. M., and Mohamed, H. I. (2020). Minimizing adverse effects of Pb on maize plants by combined treatment with jasmonic, salicylic acids and proline. *Agronomy*, 10 (5), 699. https://doi.org/10.3390/agronomy10050699
27. Zhou, J., Zhang, Z., Zhang, Y., Wei, Y., and Jiang, Z. (2018). Effects of lead stress on the growth, physiology, and cellular structure of privet seedlings. *PloS one*, 13 (3), 137-140. https://doi.org/10.1371/journal.0191139.
28. Zulfiqar, U., Farooq, M., Saddam H., and Anjum, M. (2019). *Journal of Environmental Management*, 10 https://doi.org/.1016/j.jenvman.2019.109557

# Effects of Glutamic Acid and Aspartic Acid in Reducing Lead Stress in Lemongrass (*Melissa officianlis*)

**Zahra Ramazani[1], Aliashraf Amirinejad[*2]**, and **Mokhtar Ghobadi[3]**

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran.
E-mail: **zahra.ramezani49400@gmail.com**
2. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran.
E-mail: **a.amirinejad@razi.ac.ir**
3. Department of Plant Genetics and Production, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: **ghobadi.m@razi.ac**

«Research Article»

Received: August 3, 2024 and Accepted: October 16, 2024

## Abstract

The use of chelating agents has been introduced as a suitable strategy to reduce the detrimental effect of heavy metals in plants. To investigate the impacts of aspartic acid (AA) and glutamic acid (GA) in alleviating lead (Pb) stress in lemongrass (*Dracocephalum ruyschiana*), a factorial experiment was conducted based on a completely randomized design with three replications, in the greenhouse of Razi University, in 2023. The treatments included Pb contamination at three levels (0, 150, and 300 $mg.kg^{-1}$ soil as Pb $(NO_3)_2$), aspartic acid (AA) at three levels (0, 100, and 200 mM), and glutamic acid (GA) at three levels (0, 100, and 200 mM). Both acids were used as foliar application. The results showed that the highest proline content (8.12 $\mu mol.g^{-1}$) and soluble sugars (2.94 $mg.g^{-1}$) were obtained in 300 $mg.kg^{-1}$ of Pb, without AA and GA, which shows an increase of 320% and 285%, respectively, compared to the control (without Pb and chelating agents). Also, the highest amount of shoot and root dry weights, plant height, root length, and volume were found in the treatment of 200 mM of AA and GA, and without Pb. In general, AA and GA, as foliar spray could significantly reduce the adverse effects of Pb on the crop growth characteristics. Thus, application of these chelating agents is a convenient method to diminish the effect of Pb stress on lemongrass.

**Keywords:** Chelating agents, Heavy metal, Plant growth characteristics, Proline

[*] Corresponding author's email: a.amirinejad@razi.ac.ir

# Effects of Silicon and Humic Acid on Some Physiological Responses in Bell Pepper at Different Salinity Levels

**M.K. Dehghani[1*], R. Ghasemi[2], S. Safarzadeh[3] and M. Etemadi [4]**

1.PhD candidate, Soil Science Department, School of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran. E-mail: **mk.dehghani@hafez.shirazu.ac.ir**

2.Professor, Soil Science Department, School of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran. E-mail: **ghasemif@shirazu.ac.ir**

3.Assistant Professor, Soil Science Department, School of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran. E-mail: **safarzadeh@shirazu.ac.ir**

4.Assistant Professor, Department of Horticulture Science, School of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran. E-mail: **m.etemadi@shirazu.ac.ir**

« Research Article»

Received: November 18, 2023 and Accepted: September 9, 2024

## Abstract

Salinity stress is one of the most critical causes restricting plant growth and development in arid and semi-arid regions. It is possible to use strategies to prevent plant yield loss in these areas. One of these strategies is the use of growth stimulants. The purpose of this study was to look into the influence of humic acid and silicon consumption on bell pepper growth under different salinity levels. This experiment was carried out in the research greenhouse of the School of Agriculture, Shiraz University, in 2019. Salinity treatment as saline water had conductivities of 0, 1.7, 3.4 and 5.1 $dS.m^{-1}$ and were added to the plants during the growth, while humic acid, silicon, and the simultaneous application of these two were applied to reduce the effects of salinity. Humic acid was added twice, each time 0.5 grams per kilogram of soil, and silicon was applied as a foliar spray from a source of potassium silicate with a concentration of 1%. According to the results, level 5.1 $dS.m^{-1}$ of salinity decreased 63% of shoot dry weight, compared to the control. Among the stimulant growth treatments, only humic acid showed a significant effect on increased plant biomass and caused 55% increase in the dry weight of shoots and roots. Salinity significantly increased the concentration of sodium, calcium, and magnesium in the plant, resulting in 750% sodium, 176% calcium, and 101% higher magnesium for 5.1 $dS.m^{-1}$ level of salinity compared to the control. The findings of the treatments revealed that each treatment generated changes in several plant features, for example, the simultaneous application of humic acid and silicon caused 76% increase in sodium concentration in the plant, and humic acid treatments caused 28% decrease in root calcium concentration. According to the results of this research, humic acid improved more than silicon treatment, and the simultaneous application of humic acid and silicon could reduce the effects of salinity.

**Keywords**: Growth stimulants, Organic matter, Salinity stress, Water salinity

* - Corresponding author's email: mk.dehghani@hafez.shirazu.ac.ir

# Role of *Funneliformis mosseae* Mycorrhizal Fungus in Absorption, Transfer and Bioaccumulation Pattern of Cadmium and Copper in Pistachio Plant

**N. Rohani***

Department of Biology, Payam-e-Noor University, Tehran, Iran: N_rohani@pnu.ac.ir

«Research Article»

Received: April 30, 2024 and Accepted: October 22, 2024

## Abstract

The toxicity of metals is an important environmental problem due to their persistence, non-biodegradability, and their bioaccumulation in the organs of living plants and animals.

One of the methods that can be used for reducing the harmful effects of heavy metals especially cadmium and copper, is the use of mycorrhizal fungus. This research was conducted to determine the effect of the mycorrhizal fungus *Funneliformis mosseae* on absorption and transfer of cadmium and copper of pistachio cultivar Ahmad Aghaei in response to increasing soil copper and cadmium concentrations. The experiment was performed in factorial form of a completely randomized blocks consist of three levels of copper (0, 300 and 600 mg/L of copper nitrate),four levels of cadmium (0, 200, 600 and 1000 mg/L of cadmium nitrate) and two treatments: inoculated with *F.mosseae* and without mycorrhizal inoculum. In all the control and plants treated with cadmium and copper, the length and dry weight of root and stem of mycorrhizal plants were more than non-mycorrhizal plants. Also the amount of cadmium and copper transferred from their root to the aerial part (Translation Factor) was significantly lower than the non-mycorrhizal plants. The results showed that the Bioconcentration Factor in plants inoculated with mycorrhizal fungus was significantly lower than non-mycorrhizal plants. Therefore the symbiosis with *F. mosseae* caused more stabilization and accumulation of cadmium and copper in the root.

**Key words**: Heavy metal, Phytoremediation, Symbiosis, Translocation Factor

*- Corresponding author's email N_rohani@pnu.ac.ir

# Digital Mapping of Soil Salinity Using Auxiliary Data and Machine Learning Models in Badr Watershed, Kurdistan Province

**M. Zarinibahador[1] *and R. Sharifi[2]**

1.Agriculture and Natural Resources Research and Education Center of Tehran Province, Agriculture Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran. **moslem.zarini@ymail.com**
2.Faculty member of Agriculture and Natural Resources Research and Education Center of Tehran Province, Agricultural Research, Extension, and Education Organization Organization (AREEO), Tehran, Iran. **rahmansharifi@yahoo.com**

«Research Article»

Received: July 14, 2024 and Accepted: October 16, 2024

**Abstract**

Use of remote sensing and machine learning techniques are increasingly recognized as cost-effective methods for displaying soil salinity maps. In this study, Landsat 8 satellite data and sophisticated machine learning techniques were used to map and evaluate soil salinity levels in the Badr Watershed. In this study, several Machine Learning techniques were used to predict salinity values in Badr Watershed. These algorithms included K-nearest neighbor (KNN), decision tree analysis (DTA), artificial neural network (ANN), random forest (RF) and mixed multivariate linear regression (MLR). In the first stage, auxiliary data such as Landsat 8 satellite images of the region and a digital elevation model with a spatial resolution of 10 meters were prepared from the country's Mapping Organization. The geological map of Qorveh was prepared from the geological site of the country, and the geological map of the Badr Watershed was extracted from it and digitized in the environment of the geographic information system. The geomorphological map was drawn and the location of the observation points was determined. Then, modeling was done, digital maps of soil classes and characteristics were prepared and the models were evaluated. Based on the Latin Supercube Technique, 125 outcrops were selected and excavated in the study area. After air-drying in the laboratory, the soil samples were pounded and passed through a 2 mm sieve. Then, soil salinity was measured. In order to estimate soil characteristics, two different conditions were investigated in this study. In the first case, ANN models, DTA and linear MLR were used for prediction. Also, to combine the results of the models, the nearest KNN was used. The results showed that the important auxiliary variables in predicting soil salinity, in order of importance, were geomorphology, depth of the valley, smoothness index of the ridge with a high degree of resolution, wetness index, slope direction, digital height model, basin slope, relative position of the slope, slope amount and slope length. Also, the results of the evaluation showed that among the models used to predict salinity, the combined MLR model with a coefficient of determination of 0.611 and a square root mean square error of 0.032 had the highest accuracy for prediction.

**Keyword:** Digital mapping, Decision Tree Analysis, Machine learning, Landsat 8, Multivariate Linear Regression

*-Corresponding author's email :moslem.zarini@ymail.com

# The effect of Long-Term Pistachio Cultivation on Phosphorus Fractions and Some Soil Characteristics

**F. Abbaszadeh[1*], M. Hejazi–Mehrizi [2], N. Boroomand[2], and H. Naghavi[3]**

1-Ph.D. Student, Shahid Bahonar University of Kerman; E-mail: f.abbaszadeh@agr.uk.ac.ir
2-Associate Prof., Dept. of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman; E-mail: mhejazi@uk.ac.ir
2-Associate Prof., Dept. of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman; E-mail: nboroomand@uk.ac.ir
3-Associate Prof., Kerman Agricultural and Natural Resources Research and Education center; E-mail: h.naghavi@areeo.ac.ir

«Research Article»

Received: February 18, 2024 and Accepted: August 14, 2024

**Abstract**

This research examined the impact of long-term pistachio cultivation on soil inorganic phosphorus (P) fractions. Soil properties and phosphorus fractions, particularly residual-P, were compared at different depths in pistachio cultivated and the adjacent uncultivated lands in Kerman Province. Soil samples were collected from four different depths (0-10, 10-20, 20-30, and 30-50 cm) in triplicates from both pistachio-cultivated and the adjacent uncultivated lands, using a randomized systematic method. The physical and chemical properties of soil samples were measured, along with soil P fractions, and the data were analyzed using the one-way ANOVA. The findings indicated that, with the exception of bulk density, other soil properties exhibited significant differences between the two land uses. The electrical conductivity (EC) of soil in pistachio-cultivated land was lower than that in uncultivated land, whereas the amounts of calcium carbonate and soil organic matter were greater in the pistachio-cultivated land. The highest content of calcium carbonate (26.2%) and organic matter (0.9%) was found at 10-20 cm depth. There was a significant difference between the two lands regarding inorganic phosphorus fractions. The results showed that soil total and available P concentration were higher in pistachio land compared to uncultivated land by 3% and 37%, respectively. Pistachio land had a higher amount of soil residual-P (146.2 mg/kg) as compared to the uncultivated land (129.8 mg/kg). Additionally, it was observed that the concentration of residual-P fluctuated at different depths. The amount of residual-P was lowest at a depth of 0-10 cm (117 mg/kg) and highest at a depth of 10-20 cm (154 mg/kg). Based on the results obtained, it was found that HCl-P was the most prevalent fraction of inorganic phosphorus in both lands. The findings indicated that understanding phosphorus fractions is crucial for effective phosphorus management in pistachio-cultivated land.

**Keywords:** Land use, Residual phosphorus, Saline soils, Phosphorus fractions Phosphorus management.

*- Corresponding author's email: f.abbaszadeh@agr.uk.ac.ir

# Estimating the Area under Rice Cultivation in Guilan Province Using Remote Sensing Technology and GEE

**M. Rezaei[1]*, E. Amiri[2] and M. Kamali[3]**
1.Rice Research Institute of Iran, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Rasht, Iran. mrezaeii@yahoo.com
2. Department of Water Engineering, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran. eamiri57@yahoo.com
3.Rice Research Institute of Iran, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Rasht, Iran. mortezakamali2013@gmail.com

«Research Article»

Received: July 2, 2024and Accepted: October 16, 2024

## Abstract

Lack of water, increase in production costs, change in land use, and increase in demand for food have caused the accurate determination of spatial and temporal monitoring of the paddy fields area to be extremely important for planners and decision makers. Actually, the use of field methods to estimate the cultivated area of crops in large areas is costly and time-consuming, and is associated with errors. Hence, the purpose of this study was to use remote sensing images to estimate the paddy fields area in the Guilan Province by the best classification method. Therefore, Sentinel 2 satellite images were analyzed using 6 supervised classification methods including ML, CART, RF, SVM, GME and RF-NDVI methods in GEE environment. The ML method was performed in the ENVI environment and the rest of the methods were performed in the cloud space of the GEE environment. The results of using the classification methods showed that the Random Forest method along with the NDVI (RF-NDVI) with a kappa coefficient of 0.94 and total accuracy of 0.90 had the highest accuracy compared to the other methods, which shows the effect of the vegetation index in distinguishing between paddy fields and other land uses. This estimation of the area under rice cultivation in the province showed that the net area of the total paddy fields in the province was 218,135 ha. This estimate, compared to the available statistics of the Agricultural Jihad Organization (238,012 ha) and the Regional Water Company of Gilan Province (245,000 ha) was, respectively, 8.35%. and 10.96% less.

**Keywords:** Supervised classification, Sentinel-2, Satellite images, Cloud computing

*- Corresponding author's email: rezaei7@gmail.com

# Contents

**Subject** **Page**

**Estimating the Area under Rice Cultivation in Guilan Province Using Remote Sensing Technology and GEE…….7**

**M. Rezaei, E. Amiri and M. Kamali**

**Investigation of Long-Term Pistachio Cultivation Influence on Phosphorus Species and Some Soil Characteristics……..8**

**F. Abbaszadeh, M. Hejazimehrizi, N. Boroomand and H. Naghavi**

**Digital Mapping of Soil Salinity Using Auxiliary Data and Machine Learning Models in Badr Watershed, Kurdistan Province……...9**

**M. Zarinibahador and R. Sharifi**

**Role of Funneliformis mosseae Mycorrhizal Fungus in Absorption, Transfer and Bioaccumulation Pattern of Cadmium and Copper in Pistachio Plant …….....10**

**N. Rohani**

**Effects of Silicon and Humic Acid on Some Physiological Responses in Bell Pepper at Different Salinity Levels…….....…….....11**

**M.K. Dehghani R. Ghasemi, S. Safarzadeh and M. Etemadi**

**Effects of Glutamic Acid and Aspartic Acid in Reducing Lead Stress in Lemongrass (Melissaofficianlis)……..……..……..……...12**

**Zahra Ramazani, Aliashraf Amirinejad and Mokhtar Ghobadi**

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

**Soil and Water Research Institute  Soil Science Society of Iran**

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

**Vol. 38, No. 2**
**2024**

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

## *Editorial Board*

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

**English Editor:** Hamid Siadat, PhD
**Type and design:** Kiana Khamehchi

**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 38 \ No.2\ 2024

ISSN: 2228 -7124

## Contents

Subject Page

Estimating the Area under Rice Cultivation in Guilan Province Using Remote Sensing Technology and GEE……7

M. Rezaei, E. Amiri and M. Kamali

Investigation of Long-Term Pistachio Cultivation Influence on Phosphorus Species and Some Soil Characteristics……..8

F. Abbaszadeh, M. Hejazimehrizi, N. Boroomand and H. Naghavi

Digital Mapping of Soil Salinity Using Auxiliary Data and Machine Learning Models in Badr Watershed, Kurdistan Province……...9

M. Zarinibahador and R. Sharifi

Role of Funneliformis mosseae Mycorrhizal Fungus in Absorption, Transfer and Bioaccumulation Pattern of Cadmium and Copper in Pistachio Plant ……10

N. Rohani

Effects of Silicon and Humic Acid on Some Physiological Responses in Bell Pepper at Different Salinity Levels……11

M.K. Dehghani R. Ghasemi, S. Safarzadeh and M. Etemadi

Effects of Glutamic Acid and Aspartic Acid in Reducing Lead Stress in Lemongrass (Melissaofficianlis)……...12

Zahra Ramazani, Aliashraf Amirinejad and Mokhtar Ghobadi