



دانشگاه ولی عصر



مجموعه مقالات چهاردهمین کنگره علوم خاک ایران  
۱۶ تا ۱۸ شهریور ۱۳۹۴ - دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان

# کنگره خاک ایران چهاردهمین کنگره علوم خاک

14<sup>th</sup> Iranian  
Soil Science Congress  
2015  
the International  
Year of Soil



## محورهای کنگره

- مسائل و مدیریت خاک‌های مناطق خشک
- امنیت، حفاظت و مدیریت پایدار خاک
- مدیریت بهینه خاک و آب در باغ‌های پسته
- شیمی و آلودگی خاک و سلامت محیط زیست
- اخلاق، آموزش و فرهنگ‌سازی برای پایداری خاک‌ها
- فرسایش آب، بادی و طوفان‌های گرد و خاک
- فیزیک خاک و رابطه آب و خاک و گیاه
- بیولوژی و بیوتکنولوژی خاک
- پیدایش، رده‌بندی، ارزیابی خاک و زمین‌نما
- حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه
- فناوری‌های نوین در علوم خاک
- خاک و تغییر اقلیم



مقاله نامه

# چهاردهمین کنگره علوم خاک ایران

جلد پنجم: سخنرانی‌های کلیدی

برگزار کننده:

دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان

۱۶ تا ۱۸ شهریور ۱۳۹۴

نام کتاب: مقاله نامه چهاردهمین کنگره علوم خاک ایران - جلد پنجم: سخنرانی‌های کلیدی

تهیه و تنظیم: سید محمدباقر ملک حسینی  
ناشر: دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان  
شهریور ۱۳۹۴

## فهرست مقالات جلد پنجم

- سخن دبیر..... ۵
- تکنیک‌های نوین مدل‌سازی (Modeling) در علوم خاک (کاربردها و چالش‌ها)..... ۶
- نقشه‌برداری خاک: سنتی یا مدرن؟..... ۱۲
- Using the HEMC method in soil research..... ۲۰
- ارزیابی تناسب اراضی، چرا و چگونه؟..... ۲۹
- روش‌های نوین در خاک‌شناسی و تخمین‌گرهای خاک: از تئوری تا کاربرد..... ۱
- شاخص‌های نوین کیفیت فیزیکی خاک..... ۹
- بیوچار و کاربردهای زیست‌محیطی آن..... ۱۷

سپاس بی‌کران خداوندی را سزاست که نعمت خویش را بر خلائق تمام کرد و همگی ما را مفتخر به خدمت خلق خود ساخت و نیز توفیق برگزاری چهاردهمین کنگره علوم خاک ایران را در دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان نصیبمان ساخت.

خاک در تولید غذا، پوشاک، چوب، مواد اولیه صنعت و انرژی، ذخیره و تصفیه آب، فعالیت‌های عمرانی و شهرسازی، دفن پسماندها و پساب‌ها، ذخیره کربن اتمسفر و کاهش گازهای گلخانه‌ای، حمایت و حفاظت از تنوع زیستی و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد و خدمات گسترده‌ای را در سلامت انسان و زیست‌بوم و حفاظت محیط زیست ارائه می‌نماید. به علت اهمیت و نقش سرنوشت‌ساز منابع خاک و جلوگیری از هدررفت و نابودی آن، سازمان ملل متحد سال ۲۰۱۵ میلادی را به‌عنوان "سال جهانی خاک" نام‌گذاری نموده است. هم‌چنین، هر سال روز پنجم دسامبر (۱۵ آذر) به‌عنوان "روز جهانی خاک" معرفی گردیده است. در چنین شرایطی، افراد آگاه و صاحبان دانش باید وظایف خطیر خود را انجام داده و با تلاش بی‌وقفه، آگاه‌سازی مسئولین و افسار مختلف را همت خود قرار دهند و دین خود را به جامعه ادا نمایند تا ضمن کاهش مشکلات مربوط به خاک‌های کشور، مردم بیش از این در معرض خطرات پیش رو قرار نگیرند.

به زعم اینجانب، اولویت‌های پیش روی ما که توجه به آنها می‌تواند زمینه‌ساز توفیقات بیشتر در سال‌های آتی باشد، عبارتند از:

- ۱- تعیین متولی جدی و تشکیلات اجرایی مناسب برای حفاظت و مدیریت کیفیت منابع خاک کشور
- ۲- تصویب و اجرای قانون جامع خاک کشور که متضمن جلوگیری از تبدیل و تخریب اراضی و جنگل‌ها و مراتع باشد
- ۳- عنایت به پژوهش‌های کاربردی و مشکلات ملی در این حیطه و نقش فناوری‌های نوین و شرکت‌های دانش‌بنیان در رابطه با مسایل مرتبط با علوم خاک

با توجه به این موارد و با در نظر گرفتن امکانات موجود در بخش مربوط به خاک کشور، افق پیش رو، افقی گشاده است و البته پر زحمت، که در رسیدن به آن، همت والای همگی دوستان را طلب می‌کند.

در چهاردهمین کنگره علوم خاک ایران، بر اساس روال گذشته، داورى مقالات به گروهی از صاحب‌نظران، استادان دانشگاه‌ها و پژوهشگران مؤسسات تحقیقاتی واگذار شد و در نهایت کمیته علمی کنگره از مجموع ۱۲۰۹ مقاله که به دبیرخانه کنگره واصل شده بود، ۶۴ مقاله را به‌صورت شفاهی و ۶۴۸ مقاله را به‌صورت پوستر پذیرش نمود که متن کامل مقالات پذیرفته‌شده در این مجلد در اختیار پژوهشگران و خوانندگان محترم قرار گرفته است.

امیدوارم شرکت‌کنندگان در این گردهمایی بزرگ با آخرین یافته‌های علمی کشور در زمینه علوم خاک آشنا شده و به بحث و تبادل نظر با سایر پژوهشگران بپردازند. در پایان، ضمن آرزوی موفقیت برای این کنگره که حاصل زحمات دو سال اخیر خانواده بزرگ علوم خاک کشور می‌باشد، بر خود وظیفه می‌دانم مراتب سپاسگزاری خود را نسبت به تمامی عزیزان دست‌اندرکار برای برگزاری کنگره ابراز دارم. از استادان گران‌قدر و دانشجویان و پژوهشگران جوان به سبب ارسال مقالات، از تمامی اعضای انجمن علوم خاک ایران به سبب حمایت واقعی ایشان از رشد علوم خاک کشور، از دانشگاه ولی عصر (عج) به پاس میزبانی این کنگره و زحمات فراوانشان در برگزاری آن تقدیر و تشکر می‌نمایم.

در نهایت صمیمانه‌ترین سپاس‌های خود را به دوستان و استادان بزرگوار گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، به‌ویژه جناب آقایان دکتر عیسی اسفندیارپور بروجنی (دبیر اجرایی کنگره) و حسین شیرانی (دبیر علمی کنگره) که با هیچ چشم‌داشتی، خالصانه وقت و همت خود را صرف برگزاری هرچه بهتر این کنگره نمودند، تقدیم می‌دارم.

وحید مظفری

دبیر چهاردهمین کنگره علوم خاک ایران



## تکنیک‌های نوین مدل‌سازی (Modeling) در علوم خاک (کاربردها و چالش‌ها)

حسین شیرانی

دانشیار گروه علوم خاک دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان E-mail: shirani@vru.ac.ir

### چکیده

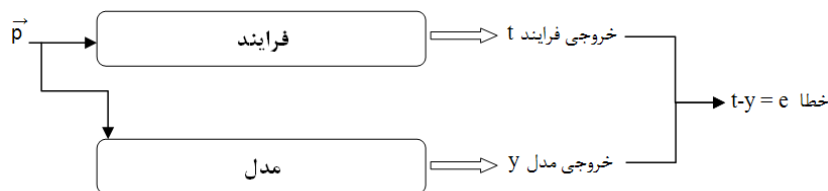
شبیه‌سازی رفتار یک فرایند و یا پدیده را اصطلاحاً مدل‌سازی می‌گویند. تکنیک‌های هوش مصنوعی مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی، سیستم‌های استنتاج فازی، درخت تصمیم و غیره کارایی بسیار خوبی در رویکردهای مختلف مدل‌سازی مانند رگرسیون، طبقه‌بندی و خوشه‌بندی دارند. تا کنون در مطالعات زیادی در زمینه علوم خاک از تکنیک‌های هوش مصنوعی به‌ویژه شبکه‌های عصبی استفاده شده است. هم‌چنین از این روش‌ها می‌توان برای کارهایی مانند انتخاب ویژگی، استخراج ویژگی و تعیین اهمیت متغیرها در مدل‌سازی با دقت بالا استفاده کرد. برای استفاده مناسب از این تکنیک‌ها باید آشنایی کافی با مبانی و مفاهیم اساسی و تئوری این تکنیک‌ها وجود داشته باشد. هم‌چنین، در استفاده از آنها باید از افراط و تفریط اجتناب نمود.

### مقدمه

در طبیعت فرایندهای زیادی وجود دارند که انسان علاقه‌مند به پیش‌بینی رفتار آن‌ها می‌باشد. به‌عنوان مثال، فرض کنید یک کشاورز زمینی در اختیار دارد و می‌خواهد بفهمد که اگر محصولی مانند زعفران کشت نماید، محصول مناسب و قابل قبولی برداشت خواهد کرد یا خیر؟ بی‌تردید، عوامل مختلفی مانند خصوصیات خاک، آب و اقلیم بر عملکرد محصول تأثیر دارند. به دیگر سخن، در این مورد یک فرایند وجود دارد که یک سری متغیرهای ورودی (ویژگی‌های خاک، آب و اقلیم) دریافت کرده و یک خروجی که همان عملکرد و یا تولید محصول است، ایجاد می‌نماید. حال در صورتی که بتوان رفتار این فرایند را پیش‌بینی نمود، به‌گونه‌ای که با داشتن خصوصیات خاک، آب و اقلیم، مقدار تولید محصول برآورد شود، کشاورز می‌تواند از وضعیت مقدار عملکرد احتمالی محصول با شرایط موجود آگاهی پیدا کند. بنابراین، قبل از این که هزینه و وقت چندانی صرف کند، می‌تواند تصمیم مناسبی در خصوص نوع کشت خود اتخاذ نماید. نمونه‌های بی‌شماری از این قبیل را می‌توان برشمرد که اهمیت و کاربرد پیش‌بینی رفتار فرایندها و پدیده‌ها را نشان می‌دهند. شبیه‌سازی رفتار یک فرایند و یا پدیده را اصطلاحاً مدل‌سازی می‌گویند. ساختاری که مکانیسم فرایند را نشان می‌دهد و حتی الامکان شبیه ساختار فرایند یا پدیده است، مدل نام دارد. در طی مدل‌سازی، یک مدل ایجاد می‌شود که همان متغیرهای ورودی فرایند مورد نظر را دریافت نموده و یک خروجی تولید می‌نماید (البته ممکن است دو یا چند خروجی نیز تولید شود). در شرایط ایده‌آل، اختلاف بین خروجی مدل و خروجی واقعی فرایند که متغیر هدف<sup>1</sup> نامیده می‌شود، صفر می‌باشد. در عمل، چنین چیزی غیرممکن است، زیرا همواره عوامل متعددی وجود دارند که باعث می‌شوند، بین خروجی مدل و متغیر هدف، تفاوت وجود داشته باشد. این تفاوت، خطا نام دارد. عوامل متعددی موجب ایجاد خطا در خروجی مدل می‌شوند، از جمله ناقص بودن ساختار مدل، خطا در اندازه‌گیری متغیرهای ورودی، عوامل ناشناخته و یا غیرقابل اندازه‌گیری که بر خروجی واقعی یا متغیر هدف اثرگذارند و غیره که همگی موجب تولید خروجی غیرواقعی توسط مدل می‌شوند. بدیهی است که مدل‌های ایجاد شده به‌روش‌های مختلف، قادر به در نظر گرفتن تمامی مکانیسم‌های فرایند یا پدیده نبوده و به‌طور کامل توانایی شبیه‌سازی آن را ندارند. هم‌چنین، همواره در اندازه‌گیری ویژگی‌های مختلف، مقداری خطا وجود دارد و عوامل یا ویژگی‌های دیگری وجود دارند که به دلایل متعدد، وارد کردن آن‌ها در مدل امکان‌پذیر نیست. شکل ۱ به‌طور شماتیک وضعیت شبیه‌سازی یک فرایند را نشان می‌دهد. در این شکل، متغیر ورودی با  $p$  نمایش داده شده است که اغلب به‌صورت بردار می‌باشد. بدین معنی که چند متغیر ورودی وجود دارد؛ ولی در خصوص تخمین، اغلب متغیر هدف ( $t$ ) و یا خروجی مدل ( $y$ ) به‌صورت یک اسکالر می‌باشند. به‌عنوان مثال، فرض کنید می‌خواهیم عملکرد محصول را توسط ویژگی‌های خاک که بر عملکرد تأثیر دارند، توسط یک مدل ساخته شده، برآورد نماییم. در این مثال، ویژگی‌های خاک مانند بافت، نفوذپذیری، pH، شوری خاک و غیره به‌عنوان متغیرهای ورودی مدل و فرایند محسوب می‌شوند. لذا ورودی مدل، بردار است که از چند متغیر تشکیل شده است (ورودی چندبعدی). در مقابل، متغیر هدف مقدار عملکرد می‌باشد که یک اسکالر است. به عبارت دیگر، به‌ازای چند متغیر ورودی، یک متغیر هدف در نظر گرفته شده است. هرچه خطای تولید شده کمتر باشد، کارایی مدل ساخته شده بهتر خواهد بود.

<sup>1</sup>Target variable

## چهاردهمین کنگره علوم خاک ایران - سخنرانی‌های کلیدی



شکل ۱- شبیه‌سازی رفتار یک فرآیند به‌وسیله‌ی مدل

اغلب موارد، دو مفهوم مدل‌سازی و برازش دادن مدل را به‌طور مشابه و یکسان تعبیر می‌کنند؛ در حالی که این دو مفهوم تا حدی با هم متفاوتند. در مدل‌سازی، ابتدا هیچ مدلی وجود ندارد؛ بلکه با توجه به داده‌های مشاهده‌ای، مدل ایجاد می‌شود. در برازش مدل، در ابتدا یک مدل از قبل وجود دارد و این مدل بر داده‌های اندازه‌گیری برازش داده می‌شود و پارامترهای آن برای داده‌های مشاهده‌ای موجود، بهینه می‌گردد. به‌طور مثال، برای فرایند نفوذ آب در خاک، مدل فیلپ ارایه شده است که مقدار نفوذ تجمعی را با گذشت زمان شبیه‌سازی می‌کند. اگر این مدل بر داده‌های اندازه‌گیری نفوذ با زمان برازش داده شود، می‌توان مقدار بهینه‌ی پارامترهای مدل را برای آزمایش خود به‌دست آورد. این عمل برازش دادن مدل محسوب شده و مدل‌سازی نیست. حال اگر با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای ورودی و هدف، از ابتدا یک مدل مثلاً توسط شبکه عصبی مصنوعی و یا یک روش دیگر (منطق فازی، درخت تصمیم و غیره) ایجاد شود، این فرایند مدل‌سازی محسوب می‌شود؛ زیرا یک مدل جدید ساخته می‌شود، نه این که از یک مدل ایجاد شده در قبل استفاده شود. البته باید توجه داشت که اغلب در مدل‌سازی، برازش مدل هم انجام می‌شود. بدین معنی که پس از ایجاد مدل، برازش نیز به‌منظور بهینه کردن پارامترهای آن انجام می‌گیرد.

### رویکردهای مختلف در مدل‌سازی

به‌طور کلی، رویکردها و کاربردهای مختلف مدل‌سازی را می‌توان به صورت زیر تقسیم‌بندی نمود:

۱- تخمین یا رگرسیون<sup>۲</sup> (تقریب تابع)

۲- طبقه‌بندی<sup>۳</sup>

۳- خوشه‌بندی<sup>۴</sup>

در رگرسیون، متغیر هدف (وابسته یا پاسخ) یک کمیت پیوسته بوده؛ ولی متغیرهای ورودی (مستقل یا پیشگو) می‌توانند پیوسته، گسسته یا رسته‌ای باشند. در این کاربرد، هدف ایجاد مدلی است که بتواند با استفاده از متغیرهای ورودی، متغیر هدف را با دقت مناسبی برآورد نماید. این کاری است که رگرسیون در آمار کلاسیک انجام می‌دهد. به‌عنوان مثال، تخمین عملکرد محصول (متغیر هدف) با استفاده از ویژگی‌های خاک، آب و غیره (متغیرهای ورودی) به یک روش مدل‌سازی معین مانند شبکه عصبی مصنوعی، از این جمله محسوب می‌شود. در این رویکرد، عمومیت داشتن مدل از اهمیت بسیاری برخوردار است. لذا عملکرد مدل باید با استفاده از مجموعه داده‌هایی که در ساخت و آموزش مدل به‌کار نرفته‌اند، مورد آزمون قرار گیرد. در رویکرد رگرسیون، معمولاً هر قدر تعداد رکوردها بیشتر و دامنه‌ی تغییرات متغیرهای ورودی و هدف وسیع‌تر باشد، روش مدل‌سازی به‌کار گرفته شده، از اعتبار بیشتری برخوردار خواهد بود.

معمولاً در رویکرد تخمین، متغیرهای ورودی باید به‌راحتی قابل اندازه‌گیری و کم‌هزینه باشند. به‌عبارت دیگر، این متغیرها سهل‌الوصول و یا زودیافت باشند. در مقابل، متغیر هدف (پاسخ)، دیریافت و یا اندازه‌گیری آن سخت و پرهزینه است. در علوم خاک، به مدل‌ها و یا توابعی که به‌وسیله‌ی آن‌ها، می‌توان با استفاده از متغیرهای (ویژگی‌های) زودیافت خاک، یک متغیر دیریافت را برآورد نمود، اصطلاحاً توابع انتقالی<sup>۵</sup> خاک می‌گویند.

در طبقه‌بندی، متغیر هدف یک کمیت گسسته و یا یک کلاس یا طبقه می‌باشد. متغیرهای ورودی مانند رگرسیون می‌توانند پیوسته و یا گسسته باشند. فرض کنید می‌خواهیم با استفاده از یک سری ویژگی‌های فیزیکی خاک، کیفیت فیزیکی خاک را به‌صورت طبقه‌ای تعیین نماییم. طبقات شامل مناسب، با محدودیت کم و محدودیت زیاد می‌باشند. در مدل ایجاد شده، متغیر هدف، همین کلاس‌ها یا طبقات هستند که می‌توان به‌جای آن‌ها از اعداد گسسته یا کدهایی به‌ترتیب مانند ۱، ۲ و ۳ استفاده نمود. بنابراین، هر رکوردی که دارای کیفیت فیزیکی مناسب است، عدد متغیر هدف آن مثلاً ۱، با محدودیت کم عدد ۲ و محدودیت زیاد عدد ۳ قرار می‌گیرد. مقدار متغیرهای ورودی نیز در هر رکورد، مشخص می‌باشد. پس از ایجاد مدل مناسب و معتبر، می‌توان با داشتن مشخصه‌های فیزیکی مورد نظر برای یک خاک، کلاس یا طبقه‌ی آن خاک را از نظر کیفیت فیزیکی به‌دست آورد. در رویکرد طبقه‌بندی نیز مانند تخمین، عمومیت مدل اهمیت داشته و مدل باید با داده‌های آزمونی (مجموعه داده‌هایی که در ساخت و آموزش مدل به‌کار نرفته‌اند)، ارزیابی شود. در طبقه‌بندی، معمولاً هر قدر تعداد رکوردها بیشتر و دامنه‌ی تغییرات متغیرهای ورودی وسیع‌تر باشد، روش مدل‌سازی به‌کار گرفته شده، از اعتبار بیشتری برخوردار خواهد بود. در اینجا، متغیر هدف کلاس یا طبقه است و نیازی به این که تغییرات کلاس‌ها (متغیر هدف) زیاد باشد، نیست و ممکن است فقط دو کلاس بیشتر نداشته باشیم.

<sup>2</sup> Regression

<sup>3</sup> Classification

<sup>4</sup> Clustering

<sup>5</sup> Pedotransfer functions

تفاوت عمده‌ی خوشه‌بندی با دو رویکرد قبلی در این است که در خوشه‌بندی متغیری به‌نام متغیر هدف وجود ندارد. در این روش، رکوردها با توجه به شباهت‌هایی که با یکدیگر (از نظر متغیرهای اندازه‌گیری شده) دارند، گروه‌بندی می‌شوند. به هر گروه، خوشه یا کلاستر می‌گویند. معیارهای تشابه می‌توانند متفاوت باشند که یکی از معیارهای معروف، فاصله‌ی اقلیدسی است. بیان جزئیات خوشه‌بندی، خارج از مباحث این کتاب می‌باشد؛ ولی ذکر این نکته مفید است که روش‌های تخمین و طبقه‌بندی را اصطلاحاً روش‌های مدل‌سازی نظارت شده و یا با ناظر می‌نامند. دلیل آن وجود متغیر هدف است که به‌عنوان یک معلم یا ناظر در ایجاد و آموزش مدل عمل می‌کند و مدل باید طوری پارامترهای خود را تغییر دهد که اختلاف خروجی آن با مقدار متغیر هدف (مقدار مشاهده‌ای) به حداقل ممکن برسد. در واقع، خطا با استفاده از مقدار متغیر هدف به‌دست می‌آید. در مقابل، روش خوشه‌بندی یک روش بدون ناظر یا نظارت نشده محسوب می‌گردد. در این رویکرد، متغیر هدفی وجود ندارد که بر اساس آن میزان خطا سنجیده شود. خوشه‌بندی معمولاً به‌عنوان یک پیش‌پردازش بر داده‌ها در آمار و مدل‌سازی به‌کار گرفته می‌شود. مثلاً، ابتدا رکوردها یا داده‌ها به گروه‌های مختلف بر اساس تشابه تقسیم شده و سپس هر گروه مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد و یا گروه‌ها مقایسه می‌شوند. به‌هر حال، کلاسترینگ کاربردهای فراوانی دارد و به‌روش‌های مختلف از جمله شبکه‌های عصبی مصنوعی نیز انجام می‌شود.

### ارزیابی مدل

شاخص‌های متعددی برای بررسی کارایی و عملکرد مدل ارائه شده‌اند. همان‌طور که قبلاً بیان شد، برای کاربردهای تخمین و طبقه‌بندی، بایستی همواره تعدادی از رکوردها ابتدا کنار گذاشته شده و در ایجاد و یا آموزش مدل (برای مدل‌های با قابلیت یادگیری مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی) به‌کار نروند. به این داده‌ها، اصطلاحاً داده‌های آزمونی<sup>۶</sup> گفته می‌شود. پس از ایجاد مدل، متغیرهای ورودی این رکوردها به مدل اعمال شده و خروجی مدل به‌دست می‌آید. سپس خروجی‌های مدل با مقادیر متغیر هدف داده‌های آزمونی متناظر با خود، مقایسه شده و بر اساس شاخص‌هایی که در ادامه بیان می‌گردند، مدل ارزیابی می‌شود. اگر فقط بررسی اهمیت متغیرهای ورودی مد نظر باشد، شاخص‌های مورد نظر برای رکوردهایی محاسبه می‌شوند که در ایجاد و آموزش مدل به‌کار رفته‌اند؛ زیرا روابط با استفاده از این داده‌ها کشف شده و استخراج می‌شوند.

### تکنیک‌های نوین در مدل‌سازی

#### شبکه‌های عصبی مصنوعی (Artificial neural network)

شبکه‌های عصبی، یکی از موضوعاتی است که در مسایل مدل‌سازی، پیش‌بینی و رده‌بندی با حجم داده‌ی زیاد استفاده می‌شوند؛ اگرچه استفاده از آن‌ها با داده‌های کم نیز امکان‌پذیر است. اساس این شبکه‌ها بر پایه‌ی ساختار مغز انسان استوار می‌باشد که با توجه به نوع کارکرد مغز، دریافت اطلاعات و پردازش آن‌ها در نهایت یک خروجی تولید می‌کند. در هر حال، شبکه‌های عصبی، شاخه‌ای از علوم هستند که قدمت چندانی ندارند و متولد قرن بیستم می‌باشند. انواع شبکه‌های عصبی مصنوعی وجود دارند که هر یک دارای قابلیت‌های خاص خود می‌باشد. مهمترین آن‌ها عبارتند از:

- ۱- پرسپترون چند لایه (Multi layer perceptron (MLP)  
این شبکه‌ها برای کاربرد تخمین و طبقه‌بندی بخوبی استفاده می‌شوند و برای داده‌های با تعداد رکورد زیاد مناسب هستند.
- ۲- شبکه‌های شعاع مبنا (Radial basis function (RBF)  
این شبکه‌ها نیز مانند پرسپترون برای اهداف تخمین یا رگرسیون و طبقه‌بندی با تعداد داده‌های خیلی زیاد مناسب بوده و تفاوت اصلی آنها با MLP در نوع تابع فعالیت است که از نوع شعاعی می‌باشد. هم‌چنین در این شبکه‌ها ورودی ابتدا در تابع شعاعی وارد شده و سپس در یک وزن مخصوص ضرب می‌شود؛ در حالی که در پرسپترون ابتدا ورودی در یک وزن ضرب شده و سپس وارد تابع فعالیت می‌شود.
- ۳- ماشین‌های بردار پشتیبان (Support vector machine (SVM)  
کاربرد اصلی این شبکه‌ها در طبقه‌بندی است؛ ولی برای رگرسیون و خوشه‌بندی نیز به‌کار می‌روند. در مواقعی که تعداد مشاهدات (رکوردها) کم و ابعاد ورودی (تعداد متغیرهای ورودی) زیاد باشند، این مدل‌ها کارایی بهتری نسبت به دو روش قبلی دارند. هم‌چنین از مزایای آنها این است که برخلاف دو روش قبلی، حالت جعبه سیاه ندارند و معادله‌ای قابل استفاده ارائه می‌کنند.
- ۴- نگاشت‌های خودسازمانده (Self-organizing map (SOM)  
این شبکه‌ها مخصوص خوشه‌بندی طراحی شده‌اند و قابلیت قوی کارایی بسیار خوبی در این زمینه دارند.
- ۵- شبکه‌های Learning vector quantization (LVQ) و غیره  
این روش مدل‌سازی برای طبقه‌بندی اختصاص یافته و بسیار مناسب است. انواع دیگری از شبکه‌های عصبی نیز وجود دارند که ذکر همه آنها در این مقاله مقدور نیست.

<sup>۶</sup> Test Data

### سیستم‌های استنتاج فازی و فازی-عصبی (ANFIS و FIS)

این روش مدل‌سازی بر پایه منطق فازی است. سیستم‌های استنتاج فازی برای مدل‌سازی فرایند در مواردی که داده‌ای وجود ندارد نیز بسیار مناسب هستند. سیستم‌های فازی-عصبی ترکیبی از فازی و شبکه عصبی است که پارامترهای توابع عضویت بر اساس قاعده موجود در آموزش شبکه‌های عصبی و با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای بهینه می‌شوند.

### درخت تصمیم (DT) Decision tree

این روش برای طبقه‌بندی بسیار کارآمد بوده و برای رگرسیون نیز مناسب می‌باشد. درخت تصمیم نسبت به داده‌های پرت حساس نیست و داده‌های پیوسته و رشته‌ای را بخوبی مدل‌سازی می‌کند که از مزایای آن محسوب می‌شوند.

### شبکه‌های باور بیزی (BBN) Bayesian belief network

این روش برای طبقه‌بندی و خوشه‌بندی مناسب است. شبکه‌های بیزی بر مبنای دانش خبره بوده و از اطلاعات و دانش افراد برای ایجاد مدل بیشتر استفاده می‌کنند.

### موجک‌ها (Wavelets)

این روش برگرفته از آنالیز فوریه در ریاضی می‌باشد و برای پیش‌بینی سری‌های زمانی و استخراج ویژگی‌های کارایی بسیار خوبی دارد.

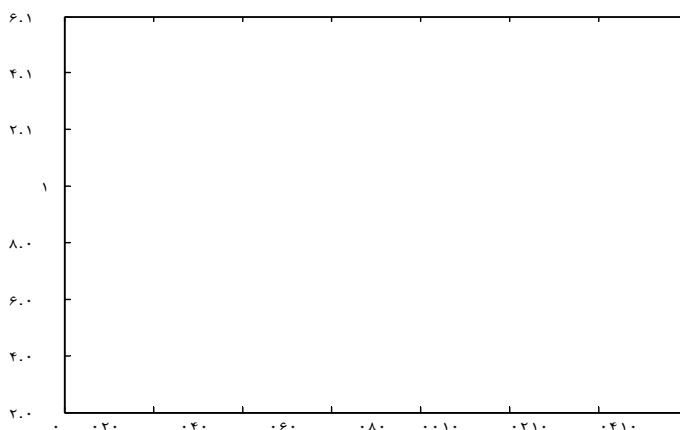
### الگوریتم‌های تکاملی (Evolutionary Algorithms)

یکی از روش‌های بهینه‌سازی بسیار کارآمد محسوب می‌شوند که الهام گرفته از طبیعت هستند. برخی از این الگوریتم‌ها عبارتند از : الگوریتم ژنتیک، ازدحام ذرات، کلونی مورچگان و غیره. این الگوریتم‌ها برای بهینه‌سازی توابع پیچیده که مشتق‌پذیر نبوده و یا دارای نقاط اکسترمم محلی زیادی می‌باشند، معمولاً کارایی بهتری نسبت به الگوریتم‌های کلاسیک دارند.

### سایر کاربردهای روش‌های مدل‌سازی نوین

#### الف- پیش‌بینی سری‌های زمانی

اگر رفتار یک سیستم و یا مقدار یک متغیر در یک مرحله یا گام زمانی، به گذشته محدود سیستم یا مقدار متغیر در مراحل قبلی بستگی داشته باشد، اصطلاحاً سری زمانی نام دارد. در علوم خاک، مقدار فرسایش و یا روان‌آب با زمان را می‌توان یک سری زمانی در نظر گرفت. هم‌چنین منحنی رخنه نیز می‌تواند یک سری زمانی باشد. در صورت پیش‌بینی یک فرایند سری زمانی، می‌توان آینده‌ی سیستم و یا فرایند البته با محدودیت‌هایی را پیش‌بینی نمود. سری‌های زمانی معمولاً از دینامیک بالایی برخوردارند. شکل ۲ یک نمونه از سری زمانی را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نمونه‌ای از یک سری زمانی آشوبی

سری‌های زمانی می‌توانند توسط روش‌هایی مانند شبکه عصبی، سیستم‌های فازی، موجک و غیره بخوبی پیش‌بینی شوند.

#### ب- کاهش ابعاد

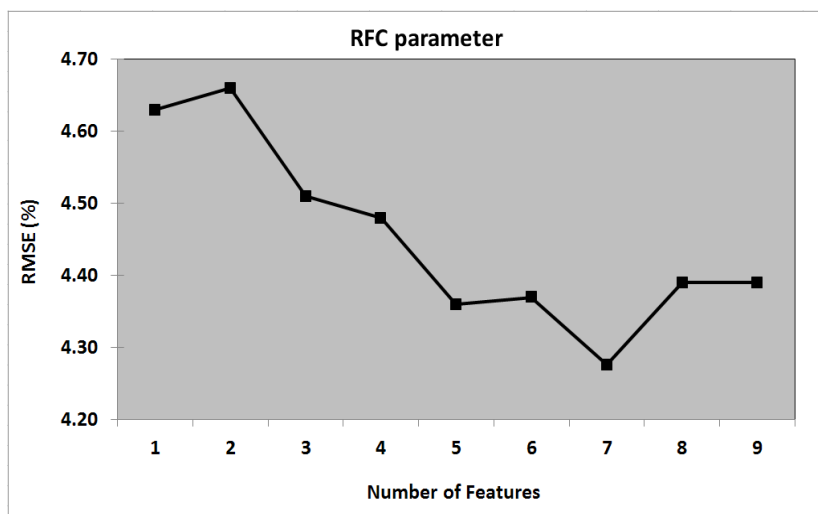
یکی از روش‌های کاهش ابعاد ورودی و حذف همبستگی بین متغیرهای ورودی، تجزیه به مؤلفه‌های اصلی یا آنالیز PCA است که در آمار استفاده می‌شود. این روش در صورتی مؤثر است که بین متغیرهای ورودی همبستگی خطی وجود داشته باشد. اگر بین این متغیرها همبستگی غیر خطی باشد، این آنالیز کاربردی ندارد. در این صورت می‌توان از تکنیک‌های نوین مانند شبکه‌های عصبی

## چهاردهمین کنگره علوم خاک ایران - سخنرانی‌های کلیدی

حافظه خودانجمنی استفاده نمود که PCA غیرخطی انجام می‌دهند و قادرند همبستگی‌های غیرخطی بین متغیرهای ورودی را از بین برده و مؤلفه‌های کم‌اثر در مدل‌سازی حذف شوند.

### ج- انتخاب ویژگی

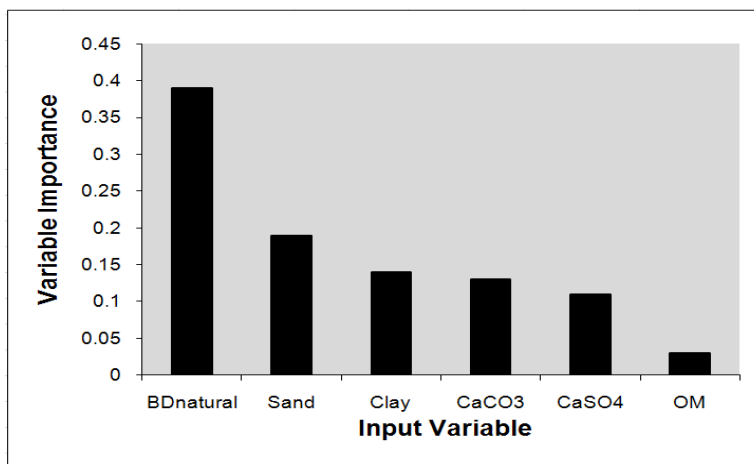
در انتخاب ویژگی، از بین یک مجموعه بزرگ متغیرهای ورودی مؤثر بر متغیر هدف، یک مجموعه کوچک‌تر به گونه‌ای انتخاب می‌شود که اگر مدل‌سازی با این مجموعه کوچک‌تر انجام شود، کاهش چندانی در دقت ایجاد نمی‌شود. به عبارت دیگر متغیرهایی انتخاب می‌شوند که اهمیت بیشتری در برآورد داشته و متغیرهای کم‌اثر کنار گذاشته می‌شوند. یکی از روش‌های بسیار کارآمد انتخاب ویژگی، استفاده از ترکیب الگوریتم‌های تکاملی با یک روش مدل‌سازی مانند شبکه عصبی است. شکل ۳ نشان می‌دهد که در برآورد یک کیفیت فیزیکی خاک (RFC) استفاده از ۷ ویژگی کمترین خطا را دارد و این ۷ ویژگی، مهمترین متغیرهای مؤثر بر RFC می‌باشند. انتخاب ویژگی با ترکیب الگوریتم PSO و درخت تصمیم انجام شده است.



شکل ۳- تعیین ویژگی‌های مهم مؤثر بر شاخص کیفیت فیزیکی خاک توسط الگوریتم PSO و درخت تصمیم

### د- تعیین اهمیت متغیرهای ورودی در مدل‌سازی

پس از مدل‌سازی اغلب این نکته حائز اهمیت است که کدام متغیرها از اهمیت بیشتری در مدل‌سازی برخوردارند. برای این منظور، پس از مدل‌سازی، می‌توان به وسیله یک روش تحلیل حساسیت، اهمیت متغیرهای ورودی مؤثر بر متغیر هدف را تعیین نمود. شکل ۴ تعیین اهمیت متغیرهای مؤثر بر تراکم خاک (بیشینه چگالی ظاهری در تست پروکتور) که به روش تغییر در ضریب تعیین انجام گرفته است را نشان می‌دهد.



شکل ۴- تعیین اهمیت متغیرهای ورودی مؤثر بر تراکم خاک

مشکلات و چالش‌ها

۱- **عدم آشنایی کافی با مفاهیم اساسی و تئوری این روش‌ها**  
 استفاده کورکورانه از این روش‌ها با نرم‌افزارهای مختلف بدون آگاهی از مفاهیم اساسی آنها، می‌تواند افراد را در تفسیر نتایج خود و یا انتخاب تکنیک مناسب با توجه به هدف و ماهیت داده‌ها دچار مشکل نماید.

۲- **دیدگاه‌های افراط آمیز و تفریط آمیز در استفاده از این روش‌ها**  
 باید دقت داشت که در استفاده از تکنیک‌های نوین مدل‌سازی در پژوهش‌های کشاورزی، دچار افراط و تفریط نشویم. بدین معنی که در انتخاب موضوع پژوهش خود به مقوله‌ی نوآوری و کاربردی بودن آن توجه داشته باشیم، نه اینکه دنبال موضوعی باشیم که در آن از یک روش مدل‌سازی مانند شبکه عصبی استفاده نماییم. به‌دیگر سخن، سعی کنیم دچار مدل‌زدگی نشویم، زیرا این‌ها ابزاری هستند که می‌توانند در شرایطی برای تجزیه و تحلیل داده‌ها مورد استفاده قرار گیرند و موضوع انتخابی نباید بر مبنای استفاده از آن‌ها مد نظر قرار گیرد، بلکه نوآوری، حل یک مشکل و یا کاربردی بودن، بایستی برای انتخاب یک موضوع پژوهشی مورد توجه قرار گیرند. در مقابل نیز، متأسفانه برخی افراد متخصص در علوم کشاورزی، نگاهی تفریط‌آمیز داشته و بر این عقیده‌اند که این روش‌ها باعث فراموش شدن رسالت اصلی پژوهش‌ها (نوآوری و کاربردی بودن) شده و مفید نیستند. در صورتی که در بسیاری از پژوهش‌ها، تکنیک‌های آماری کلاسیک، قادر به تجزیه و تحلیل مناسب داده‌ها در علوم کشاورزی نبوده، ولی روش‌های نوین مدل‌سازی مدرن، به‌خوبی از پس این کار برآمده‌اند. بنابراین، به دانشجویان گرامی توصیه می‌شود، در انتخاب موضوعات پژوهشی خود، دچار این افراط و تفریط نشوند.

منابع

- ۱- بسالت‌پور، ع.ا.، شیرانی، ح. و اسفندیارپور، ع. ۱۳۹۴. مدل‌سازی پایداری خاکدانه‌ها با استفاده از ماشین‌های بردار پشتیبان و رگرسیون خطی چندمتغیره. نشریه آب و خاک، دانشگاه فردوسی مشهد. پذیرش قطعی.
- ۲- سلطانی، س.، سرداری، س.، شیخ‌پور، م. و موسوی، س. ص. ۱۳۸۹. شبکه‌های عصبی مصنوعی، آشنایی با مبانی و کاربردها. انتشارات نص. ۲۱۶ صفحه.
- ۳- شیرانی، ح. ۱۳۹۱. برآورد برخی از نقاط منحنی مشخصه رطوبتی خاک شامل FC و PWP با استفاده از توابع انتقالی خاک و روش رگرسیونی در بردسیر کرمان. مجله علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، شماره ۵۹، صفحه ۱۵۱-۱۴۱.
- ۴- شیرانی، ح. و رفیع‌نژاد، ن. ۱۳۹۰. برآورد برخی ویژگی‌های دیریافت خاک‌های استان کرمان با استفاده از توابع انتقالی رگرسیونی و شبکه عصبی مصنوعی. مجله پژوهش‌های علوم خاک، جلد ۲۵، شماره ۴، صفحه ۳۵۹-۳۴۹.
- 5- Besalatpour, A.A., Ayoubi, S., Hajabbasi, M.A., Gharipour, A., YousefianJazi, A., 2014. Feature selection using parallel genetic algorithm for the prediction of geometric mean diameter of soil aggregates by machine learning methods. *Arid Land Res. Manag.* 28, 383-394.
- 6- Bocco, M., Willington, E., Arias, M., 2010. Comparison of regression and neural networks models to estimate solar radiation. *Chilean. J. Agr. Res.* 70, 428-435.
- 7- Burges, C.J.C. 1998. A tutorial on support vector machines for pattern recognition. *Data Mining and Knowledge Discovery.* 2: 121-167.
- 8- Ceylan, M., Arslan, M.H., Ceylan, R., Kaltakci, M.Y and Ozbay, Y. 2010. A new application area of ANN and ANFIS: determination of earthquake load reduction factor of prefabricated industrial buildings. *Civ. Eng. Environ. Syst.* 27: 53-69.
- 9- Cristianini, N., and Taylor, J.S. 2000. An Introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods. Cambridge University Press, New York.
- 10- Dai, X., Huo, Z. and Wang, H. 2011. Simulation for response of crop yield to soil moisture and salinity with artificial neural network. *Field Crops Res.* 121: 441-449.
- 11- Shirani, H., Habibi, M., Besalatpour, A. and Esfandiarpour, I. 2015. Determining the features influencing physical quality of calcareous soils in a semiarid region of Iran using a hybrid PSO-DT algorithm. *Geodema*, (259-260): 1-11.



## نقشه‌برداری خاک: سنتی یا مدرن؟

محمدحسن صالحی

استاد گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

قبل از اینکه در مورد انتخاب رویکرد یا نحوه‌ی انجام نقشه‌برداری خاک صحبت شود بهتر است از خود سؤال کنیم آیا نقشه‌برداری خاک لازم و ضروری است؟ آیا بدون انجام آن مدیریت اصولی و پایدار منابع، با مشکل روبرو می‌شود؟ اگر جواب این سوالات در ذهن ما مثبت باشد؛ مطالعه‌ی ادامه بحث می‌تواند برای ما جذاب و مفید باشد.

### اهمیت شناسایی و نقشه‌برداری خاک

در گذشته از علم خاکشناسی بیشتر برای کمک به تصمیمات مربوط به کشاورزی استفاده شده است. امروزه با افزایش جمعیت و فشار روزافزون به منابع، بحث امنیت خاک نمود بیشتری پیدا کرده است و مسائل مختلفی مانند فرسایش و رانش زمین، بیابان‌زایی، تغییر کاربری اراضی، کیفیت خاک، آلودگی خاک و محیط زیست، امنیت غذایی و تغییر اقلیم مطرح شده‌اند که هر یک به طور مستقیم و یا غیرمستقیم با شناسایی و اطلاع از وضعیت تغییرپذیری خاک‌ها در ارتباط هستند. همچنین، سهم این مطالعات را در بررسی تنوع زیستی و ذخیره‌گاه ژنتیکی نباید از خاطر دور نگاه داشت. بنابراین، بایستی خاک را به‌عنوان جزئی از اکوسیستم مطالعه نمود و به عبارت دیگر، خاکشناسی و رای مطالعات در کشاورزی است. طبق نظر ادھیکاری و هارتمینک (۲۰۱۶) اهمیت چند جانبه‌ی خاک و امنیت خاک باید در مسائل مربوط به مدیریت و پایداری منابع به‌طور قابل توجهی مد نظر قرار گیرد.

### سابقه‌ی نقشه‌برداری خاک در دنیا و کشور

از همان ابتدای پیدایش بشر و سال‌ها قبل از اختراع کاغذ، نقشه‌ها از مهم‌ترین ابزار تبادل اطلاعات بوده‌اند و اولین نقشه‌های خاک در چین برای اهداف مالیاتی تهیه شده‌اند (هارتمینک و همکاران، ۲۰۱۳). با گذشت زمان و پیشرفت علم و فناوری، نقشه‌برداری خاک نیز جنبه علمی‌تر و کمی‌تری به خود گرفته است. سابقه‌ی علم خاکشناسی به بیش از ۱۶۰ سال (مرموت و ازوران، ۲۰۰۱) بر می‌گردد. اولین نقشه‌ی خاک دنیا در سال ۱۹۰۶ توسط گلینکا تهیه شده است (هارتمینک و همکاران، ۲۰۱۳). در کشور ما نیز اولین مطالعات شناسایی و نقشه‌برداری خاک در سال ۱۳۳۲ شمسی زیر نظر وزارت نیرو (توانیر سابق) در اراضی پایاب سدها انجام شده ولی نگاهی گذرا به آمار مطالعات خاکشناسی در کشور حاکی از آن است که سرعت و مقیاس انجام این مطالعات قابل مقایسه با کشورهای پیشرفته نمی‌باشد.

جدول ۱ مقایسه‌ای بین وضعیت نقشه‌برداری در دنیا و کشور را نشان می‌دهد. به‌طور کلی تفاوت وضعیت این علم در کشورهای پیشرفته و در حال توسعه این است که در کشورهای پیشرفته، شناسایی خاک‌ها به‌صورت تفصیلی در سطح وسیع انجام شده و در نتیجه نقشه‌های پایه برای ثبت اطلاعات به‌صورت رقمی، جهت پردازش آن‌ها با فنون نوین قابل دسترس‌تر است ولی توقف و رکود فعالیت‌های پدولوژی در کشورهای در حال توسعه بیشتر به مسائل اقتصادی مربوط می‌شود (مرموت و ازوران، ۲۰۰۱). در کشور ما علاوه بر مشکلات اقتصادی، دیدگاه‌های سطحی‌نگر، سیاست‌های سازمانی و مدیریتی غلط نیز مزید بر علت هستند. گاهی بودجه کافی نبوده، گاهی بودجه درست اختصاص نیافته، گاهی اصلاً مسئولین صلاح نمی‌دانند و اولویت‌های دیگری وجود دارد! بنابراین، روند انجام این مطالعات و مساحت نقشه‌برداری شده در کشور با رکود شدیدی روبرو بوده است و اینکه خروجی نهایی این مطالعات در کشور پس از ۶۲ سال چیست واقعا جای سؤال دارد!

جدول ۱. مقایسه‌ی وضعیت نقشه‌برداری در دنیا و کشور

وضعیت نقشه‌برداری در ایران	وضعیت نقشه‌برداری در دنیا
عدم وجود نقشه خاک در سطح وسیع و مقیاس بزرگ	وجود نقشه خاک در سطح وسیع و با مقیاس بزرگ و دقت بالا
متولی بودن وزارت نیرو و تک بعدی بودن کاربرد نقشه‌ها (نشریه قدیمی و ناقص ۲۰۵ برای توصیه کشت آبی) عدم داده پایه کافی از خاک‌ها	دیدگاه جامع‌نگر از خاک در زمینه‌ی کاربری‌های مختلف وجود داده پایه کافی از خاک‌ها

### زیرساخت‌های نقشه‌برداری خاک

اگر قبول کنیم که نقشه‌برداری صرفنظر از رویکرد نوین یا سنتی آن ضروری و مورد نیاز است برای انجام این مطالعات زیرساخت‌های زیر بایستی قبلاً ایجاد شده و وجود داشته باشد:



## چهاردهمین کنگره علوم خاک ایران - سخنرانی‌های کلیدی

### ۱- آگاهی از اهمیت و نقش مطالعات خاکشناسی:

هنگامی که آگاهی برای استفاده پایدار از منابع ایجاد شود به تبع آن لزوم مطالعات نقشه‌برداری خاک برای درک پراکنش خاک‌ها و ویژگی‌های آن نمود بیشتری پیدا می‌کند. بنابراین، پیشرفت و موفقیت علم پدولوژی نیازمند ارتقاء سطح آگاهی در بین خاکشناسان و متخصصین رشته‌های مرتبط، افراد جامعه و مسئولین کشور می‌باشد. آگاهی از اهمیت خاک و انجام مطالعات خاکشناسی بایستی ابتدا در بین خاکشناسان ایجاد شود تا انتظار داشت به سایر اقشار جامعه و از جمله مسئولین برنامه‌ریزی در سطح کلان کشور انتقال یابد. تا زمانی که خاکشناسان خود را باور نداشته باشند و یا به مفید بودن خود شک داشته باشند انتظار تحول عظیم در این زمینه دور از انتظار است. اگرچه در این زمینه علاقه‌ی افراد بحثی فراتر از آگاهی می‌باشد که با مسائل دیگری مانند بازار کار و برنامه‌ریزی در سطح کلان کشور ارتباط متقابل و تنگاتنگ دارد و متأسفانه در بسیاری از موارد سیاست‌های سازمانی غلط و نگرش‌های نادرست باعث کاهش علاقه‌مندی افراد متخصص و با استعداد و در نهایت بی‌تفاوتی نسبت به نقش انجام این مطالعات می‌شود.

### ۲- کارشناسان خبره با تجربه‌ی صحرایی کافی:

پدولوژی جهت درک عمیق ارتباطات خاک و سیمای اراضی، مشخص کردن تغییرات مکانی خاک و طبقه‌بندی خاک‌ها علاوه بر دانش پایه، نیازمند مطالعات صحرایی است زیرا آگاهی و شناخت از علوم خاک و آموزش مؤثر پدولوژیست‌ها عمدتاً از طریق تجربه و مشاهده در صحرا حاصل می‌گردد (آرنولد، ۱۹۹۲) و بیشتر از هر چیز، اهمیت مطالعات صحرایی، پدولوژی را از دیگر شاخه‌های علم خاکشناسی جدا می‌کند. طبق نظر باشر (۱۹۹۷) بدون مطالعات صحرایی، آموزش پدولوژیست‌ها بسیار مشکل است و این در حالی است که در کشور ما مطالعات صحرایی و نقشه‌برداری خاک به حاشیه رفته است. بایستی اقرار کرد بسیاری از کارشناسان در علوم مختلف، تخصص، آگاهی، آموزش و تجربه‌ی کافی در زمینه کاری خود ندارند و در واقع کارشناس هستند! همین مسئله باعث می‌شود بسیاری از پروژه‌ها با مبنای علمی و تجربه‌ی کافی انجام نشوند و نه تنها وقت و هزینه زیادی تلف می‌شود بلکه مشکلات جبران‌ناپذیری را نیز بوجود می‌آورد. نمونه‌هایی از انجام این پروژه‌ها در کشور ما بسیار زیاد است و جالب آنجاست که پس از آن تلاش می‌کنند تا مقصران را محاکمه کنند!

### ۳- پایگاه داده یا بانک اطلاعات (Data base):

در هر زمینه‌ای و برای هر تصمیم‌گیری صحیح، وجود بانک اطلاعاتی از نظر کمی و کیفی دارای اهمیت بسیاری است و خاکشناسی نیز از این مسئله مستثنی نیست. جمع‌آوری داده مسئله‌ای زمان‌بر و هزینه‌بر است و یک شبه قابل انجام نیست. حال آنکه بسیاری از معضلات و مشکلات ناشی از عدم توجه به خاک در صورت وقوع، قابل جبران نیست و یا بسیار پرهزینه‌تر از آن هستند که بخواهیم از وقوع آن‌ها جلوگیری کنیم. به قول معروف نوش‌دارو بعد از مرگ سهراب دیگر چه سودی دارد؟ علاج واقعه قبل از وقوع باید کرد.

اگر این نگرش در بین مسئولان و تصمیم‌گیران کشور ایجاد شود که نیاز به اطلاعات دقیق از وضعیت خاک‌ها جزء جدایی‌ناپذیر مدیریت پایدار منبع است استفاده از اطلاعات موجود در گزارشات خاکشناسی، تخمین‌گرهای آماری و زمین‌اماری، تصمیم نتایج به مناطق مشابه و استفاده از ابزار و فنون نوین از جمله راهکارهایی هستند که با صرفه‌جویی در وقت و هزینه می‌توانند در ایجاد سریع‌تر پایگاه اطلاعاتی مفید باشند. البته قبل از ثبت این داده‌ها بایستی دقت این داده‌ها مورد بررسی قرار گیرد. در هر حال، بایستی قبول کرد که سود حاصل از انجام مطالعات خاکشناسی و مدیریت صحیح به مراتب بیشتر از ضرر و زیان‌هایی است که تخریب اراضی و مشکلات مختلف ناشی از عدم توجه به خاک، کشور را تهدید نموده و می‌کند. نگاهی به افزایش روزافزون پیامدهای ناشی از عدم برنامه‌ریزی صحیح و مدیریت غیراصولی منابع بیابان‌زایی، ریزگردها، فرسایش و رانش زمین، پر شدن سدها، احداث چاه‌های غیرمجاز، نشست زمین، خشکسالی، تغییر کاربری و سیل، آلودگی خاک و آب و هوا و بیماری‌های گوارشی و تنفسی و سرطان‌ها و میزان خسارت ناشی از هر یک از آن‌ها، هزینه‌ی انجام مطالعات خاکشناسی را توجیه می‌نماید.

### رویکردهای نقشه‌برداری خاک

امروزه برای انجام مطالعات نقشه‌برداری خاک دو رویکرد مرسوم یا سنتی (Traditional یا Convectional) و مدرن یا رقومی (Digital) وجود دارد. مینا بودن نتایج نقشه‌برداری مرسوم خاک بر پروفیل شاهد و تصمیم نتایج آن به کل واحد نقشه، ترسیم دستی نقشه‌ها و افزایش خطای ناشی از سلیقه‌ی شخصی و در نظر نگرفتن تغییرات مکانی خاک از جمله‌ی مهم‌ترین محدودیت‌های روش‌های سنتی می‌باشند. محدودیت‌های روش سنتی، نیازهای امروزه بشری و ظهور پیشرفت در تکنولوژی و GIS از سال ۱۹۸۰ موجب تغییر تدریجی از سمت نقشه‌برداری سنتی به سمت روش‌های کمی و نوین شده است. اگرچه بعد از اختراع کامپیوتر، نقشه‌های سنتی خاک به صورت رقومی ذخیره شده‌اند ولی باید در نظر داشت که این نقشه‌ها را بایستی نقشه‌های رقومی شده (digitized soil map) نامید و این نقشه‌ها با نقشه‌برداری رقومی خاک (digital soil map) که مبنای آن‌ها تخمین ویژگی یا کلاس‌های خاک به صورت پیوسته با روش‌ها و مدل‌های آماری است کاملاً متفاوت هستند (میناسنی و مکرراتنی، ۲۰۱۵).

در کشورهای پیشرفته، پروژه‌ها یا برنامه‌های مدونی در قالب کارگاه‌ها، دوره‌ها و کنگره‌های تخصصی برگزار می‌شوند که سعی در آموزش پدولوژیست‌های جوان و آشنا کردن آن‌ها با مفاهیم و روش‌های استفاده از نرم‌افزارهای نوین و رقومی دارند. از سال ۲۰۱۰ پروژه‌ای به نام پروژه‌ی جهانی نقشه‌برداری رقومی خاک (Globalsoilmap project) آغاز شده که سعی داشته ویژگی‌های مهم و کاربردی از خاک را در سطح دنیا با تفکیک مکانی بالا برآورد نماید با این هدف که بتواند تصمیم‌گیری در رابطه با تولید غذا، ریشه‌کنی فقر و سوء تغذیه، تغییرات اقلیمی و جلوگیری از تخریب محیط زیست را بهبود بخشد. اطلاعات کامل این پروژه از سایت GlobalSoilMap.net قابل مطالعه می‌باشند.

کشورهای پیشرفته تلاش می‌کنند تا برای انجام روش‌های نوین، اطلاعات نقشه‌های سنتی که حاصل سال‌ها مطالعات خاکشناسی هستند را به‌عنوان داده‌های موروثی (Legacy data) استفاده کنند (رزیتز، ۲۰۰۴؛ کمپن و همکاران، ۲۰۰۹؛ وایسی و لاکاچری، ۲۰۱۵) ولی پاسخ به این سؤال که در کشور ما پس از گذشت ۶۲ سال از انجام مطالعات خاکشناسی تا چه اندازه پایگاه داده داریم تا بتوانیم پا به پای کشورهای توسعه‌یافته از آن‌ها برای تحقق روش‌های نوین استفاده کنیم بی‌جواب مانده است!

در سال‌های اخیر، موضوع رقومی‌سازی ویژگی‌های خاک در محل مشاهده (digital soil morphometric) و نزدیک‌کاوی (Proximal sensing) مباحث جدیدی است که به معنای کاربرد ابزار و فنون نوین برای اندازه‌گیری و کمی‌کردن ویژگی‌های مشاهده شده در پروفیل خاک می‌باشد و سنسورهای به کار برده شده در این روش می‌توانند اطلاعات را با تفکیک مکانی بالا و سرعت زیاد جمع‌آوری می‌کنند. در این زمینه استفاده از توابع ریاضی برای برآورد ویژگی‌ها در عمق‌های مختلف (Depth functions) می‌تواند اطلاعات خاک را در عمق‌های مختلف خاک با سرعت بالا و هزینه کمتر برآورد نماید. بنابر گفته‌ی میناسنی و مک‌برانتی (۲۰۱۵) تعداد مقالاتی که در زمینه‌ی نقشه‌برداری رقومی منتشر شده‌اند از ۲۰ مقاله در سال ۱۹۹۰ به تقریباً ۱۸۰ مقاله در سال ۲۰۱۵ افزایش یافته‌اند که این خود مؤید پیشرفت مطالعات نقشه‌برداری رقومی در دنیا می‌باشد اما بروز و پیدایش روش‌های نوین و افزایش چشمگیر مقالات در این زمینه به معنای ایده‌آل بودن و عدم ضعف آن‌ها و یا غیرمفید بودن اطلاعات روش‌های سنتی نیست.

#### کاستی‌های موجود در روش‌های نوین

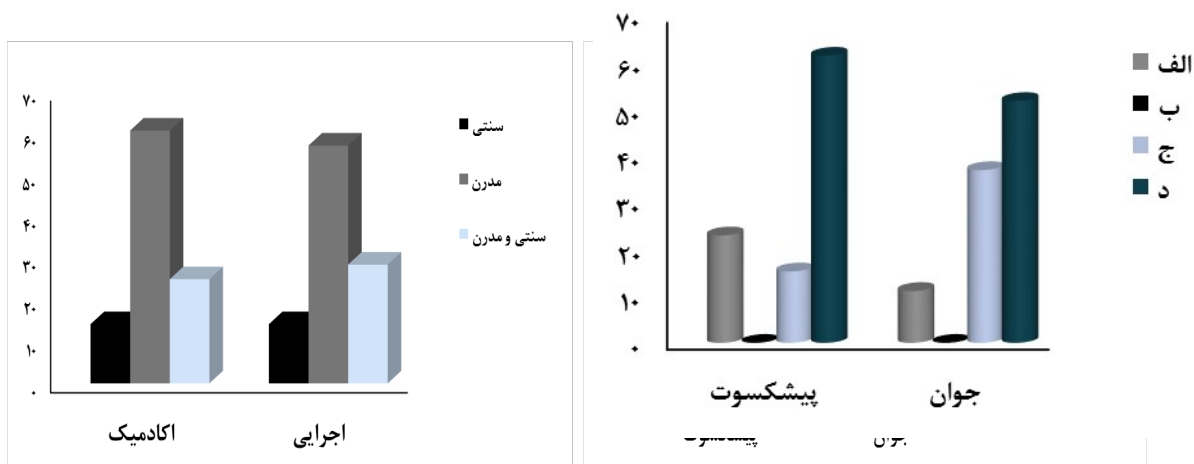
بدون توجه به مباحث اساسی و بنیادین خاکشناسی و نقشه‌برداری، روش‌های نوین هم ممکن است به نادرستی استفاده شوند و نتایج آن‌ها نه تنها درد را دوا نکند، بلکه خود پس از مدتی مشکلاتی را هم ایجاد نمایند. نبود دستورالعمل مشخص از قبیل مشخص نبودن نوع مدل و داده‌های کمی مورد نیاز، عدم تعریف مقیاس یا پیکسل مشخص برای نقشه‌های خروجی، تعداد نمونه کافی که با حداقل آن بتوان به صحت قابل قبولی دست یافت و پیچیدگی نرم‌افزارها از جمله مهم‌ترین ضعف‌های روش‌های نوین هستند که این موضوعات در سال‌های اخیر به‌وفور در دیدگاه محققین مشاهده شده است. میناسنی و مک‌برانتی (۲۰۱۵) بیان می‌کنند یکی از مهم‌ترین مشکلات روش‌های نوین این است که نتایج این مطالعات تنها در حد ارائه مقالات باقی می‌ماند و کاربردی شدن آنها و بکارگیری نتایج در بحث مدیریت و برنامه‌ریزی همچنان به عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های روش‌های نوین باقی مانده است. این محققین متنوع بودن کدهای استفاده شده برای مدل‌سازی و نبود یک دستورالعمل مشخص را از دیگر ضعف‌های روش‌های نوین بیان می‌کنند. طبق نظر گرانوالد (۲۰۱۱) روش‌های نقشه‌برداری نوین علاوه بر نیازمندی به روش‌های کمی و مدل‌سازی نیازمند تجربه‌ی صحرایی هستند که این موارد باید در تعادل با یکدیگر باشند تا بتوانند به خوبی عمل کنند و در این زمینه، آموزش پدولوژیست‌های جوان امری بسیار مهم است. میناسنی و مک‌برانتی (۲۰۱۵) آموزش تکنیک‌های نقشه‌برداری رقومی به پدولوژیست‌های جوان را گام مهمی در توسعه و بهبود این روش قلمداد می‌کنند. در هر حال، در تهیه مدل‌ها برای روش‌های نوین، خطر استفاده از داده‌های غیر صحیح نایستی فراموش شود زیرا دقت مدل بستگی تام به داده‌های ورودی مدل دارد. بنابراین، ضروری است قبل از استفاده از هر داده‌ای صحت آن مورد توجه قرار گیرد که در این زمینه بهتر است به ماهیت تغییرپذیر برخی ویژگی‌ها و به عبارت بهتر تغییرات زمانی (Temporal variability) نیز توجه شود. در نهایت، پس از اجرای مدل‌ها و انتخاب بهترین نتیجه، دقت این مدل‌ها بایستی از طریق تجزیه و تحلیل خطا و برآورد عدم قطعیت مورد بررسی قرار گیرد.

#### دیدگاه پدولوژیست‌های کشور در رابطه با وضعیت نقشه‌برداری

طبق نظرسنجی انجام شده (برای دیدن متن کامل پرسشنامه به انتهای مقاله مراجعه شود) در رابطه با مبحث نقشه‌برداری خاک از تعدادی از پدولوژیست‌های کشور (که سعی بر آن شد که بتوانند گروه‌های مختلفی از پیشکسوتان، افراد جوان، گروه آکادمیک و اجرایی را از سراسر کشور شامل شود) نتایج زیر بدست آمد:

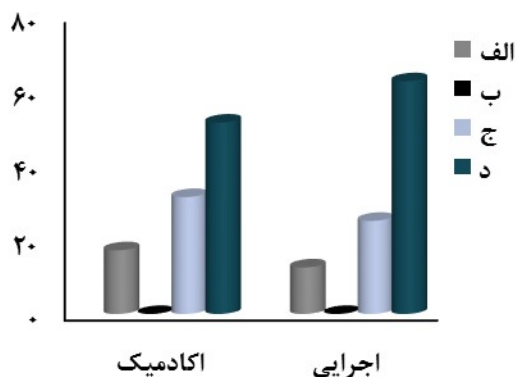
۱- اغلب خاکشناسان خواهان رویکرد جدیدی در رابطه با نقشه‌برداری خاک می‌باشند و این تقاضا در بین قشر جوان و اجرایی جامعه بیشتر است. نتایج بدست آمده از این نظرسنجی حاکی از آن است که پیشکسوتان این علم کمترین رغبت را به استفاده از روش سنتی دارند (شکل ۱).

## چهاردهمین کنگره علوم خاک ایران - سخنرانی‌های کلیدی



شکل ۱. تمایل خاکشناسان به کاربرد روش‌های سنتی و مدرن نقشه‌برداری خاک

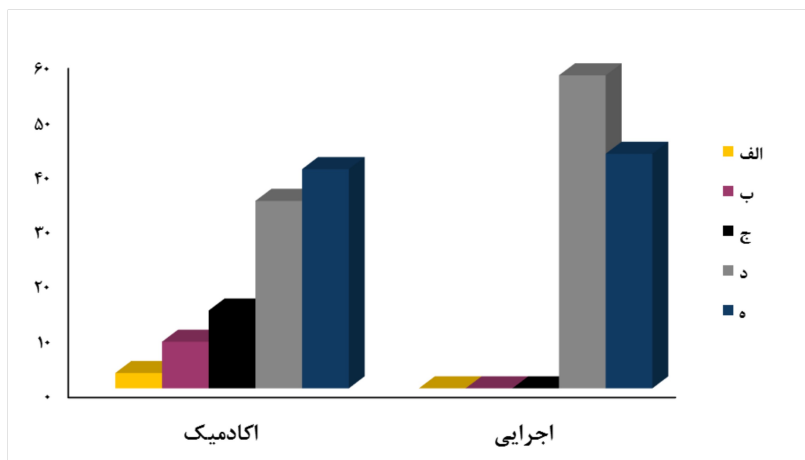
۲- علیرغم تمایل به روش‌های نوین، بیشتر خاکشناسان در رابطه با آینده‌ی نقشه‌برداری کشور بی‌مناک و ناامید هستند و این نگرانی در دیدگاه پیشکسوتان و گروه اجرایی بیشتر مشهود است (شکل ۲). این زنگ خطر بزرگ برای کشاورزی، منابع طبیعی، محیط زیست و سلامت جامعه است.



شکل ۲. دیدگاه خاکشناسان در رابطه با آینده‌ی نقشه‌برداری خاک در کشور

۳- اکثر خاکشناسان و به‌ویژه گروه اجرایی بر این عقیده هستند که حتی برای روش‌های نوین نیازمند بهبود زیرساخت‌های نقشه‌برداری (آموزش و تربیت کارشناسان خبره و تجربه) هستیم و بدون آن، صرف نظر از رویکرد رقومی یا سنتی، نقشه‌برداری صحیح و دقیق، امکان‌پذیر نیست (شکل ۳).

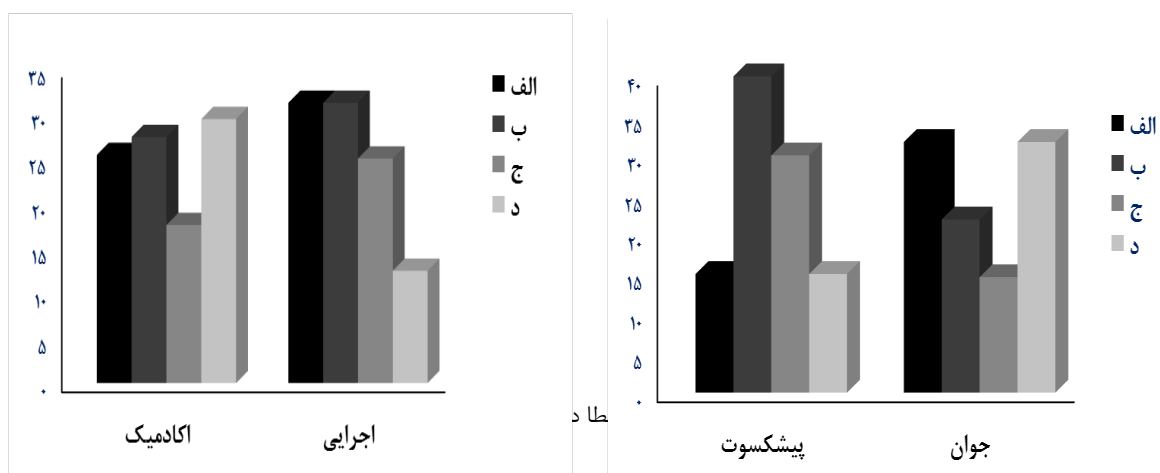
## چهاردهمین کنگره علوم خاک ایران - سخنرانی‌های کلیدی



شکل ۳. مهم‌ترین اولویت و چالش تحقیقاتی در روش‌های نوین نقشه‌برداری خاک

همان‌طور که قبلاً اشاره شد مطالعات صحرائی جزء لاینفک پدولوژی است و این مسئله در هر دو رویکرد سنتی و نوین بایستی مورد توجه کافی قرار گیرد. روش نقشه‌برداری نوین چیزی نیست جز اینکه اطلاعات حاصل از مشاهدات صحرائی (پروفیل خاک) و لایه‌های مختلف را به صورت کمی و دقیق‌تر ارائه دهیم. بنابراین، مرحله تشریح پروفیل و شناسایی رابطه خاک با لندفرم‌ها و نمونه‌برداری صحیح، پیش‌زمینه نتایج قابل اطمینان از آزمایشگاه و در نهایت پردازش و تفسیر اطلاعات آن‌هاست.

۴- پیشکسوتان چه در گروه اجرایی و چه اکادمیک، تجربه‌ی کارشناس در فرایند مدل‌سازی را مهم‌ترین منبع خطا در روش‌های نوین می‌دانند و این در حالی است که جوانان سهم عدم تجربه‌ی نقشه‌بردار را مساوی با تعداد نمونه ناکافی در نظر می‌گیرند (شکل ۴).



### چالش‌های پیش‌رو در ایران

با توجه به مطالب فوق می‌توان چالش‌های پیش‌رو در کشور را در ارتباط با مطالعات خاکشناسی و نقشه‌برداری خاک به صورت زیر خلاصه کرد:



## چهاردهمین کنگره علوم خاک ایران - سخنرانی‌های کلیدی

۱. در کشور بیش از و پیش از نیازمند بودن به روش‌های نوین در زمینه‌ی مطالعات خاکشناسی، نیازمند نگرشی نوین و منطقی هستیم که این نگرش بایستی در تمامی اقشار جامعه از جمله خاکشناسان ایجاد شود و همه به اهمیت مطالعات خاکشناسی و عواقب ناشی از عدم توجه به آن واقف باشیم.
۲. در صورتی که چالش اول با موفقیت پشت سر گذاشته شد بایستی تلاش شود هم بخش دولتی و هم بخش غیردولتی در انجام مطالعات خاکشناسی سهیم باشند.
۳. در به کارگیری روش‌های نوین بایستی با توجه به تعیین اولویت‌ها و نیازهای کشور اقدام شود ولی برای کاربرد نتایج حاصل از آن بایستی بستر مناسب از هر لحاظ قبلاً اتفاق افتاده باشد. به عنوان مثال، مدیریت یکپارچه اراضی در کشوری که مدیریت اراضی خرده مالکی است یکی از ضروریاتی است که در صورت تهیه نقشه‌های دقیق بایستی ایجاد شده باشد. در غیر این صورت نتایج دقیق قابل استفاده نخواهد بود. استفاده از نتایج مطالعات قبلی و داده‌های موروثی بایستی پس از راستی‌آزمایی مدنظر باشد.
۴. و کلام آخر اینکه برای به‌وقوع پیوستن هر يك از موارد فوق، ایجاد يك کمیته تخصصی منسجم و کارآمد به دور از روابط فردی و سازمانی در سطح کشور و زیرکمیته‌های استانی و حتی شهرستانی لازم و ضروری است. این کمیته نقش‌های بسیار مهمی خواهد داشت. از جمله این موارد می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:  
آگاهی دادن عمومی از اهمیت خاک از طریق برنامه‌های متنوع تلویزیونی، برگزاری کارگاه‌های تخصصی در ارگان‌های مختلف ذیربط، برگزاری کنگره‌های تخصصی، ایجاد ارتباط بین افراد متخصص مربوطه در کشور، تلاش در انتقال تجربه از کشورهای پیشگام مانند استرالیا، هلند و امریکا به کشور با در نظر گرفتن شرایط اجتماعی و فرهنگی جامعه و بومی‌سازی روش‌های نوین، تلاش در جهت ایجاد قانون‌گذاری خاک در زمینه‌های مختلف.

به امید آن روز....



منابعی برای مطالعه بیشتر

- Adhikari K. and Hartemink A.E. 2016. Linking soils to ecosystem services, A global review. *Geoderma*, 262:101-111.
- Arnold R. W. 1992. Becoming a pedologist. *Soil Survey Horizons* 33: 33-36.
- Basher L. R. 1997. Is pedology dead and buried? *Australian Journal of Soil Research*, 35: 979-994.
- Grunwald S., Thompson J. A. and Boettinger J. L. 2011. Digital soil mapping and modeling at continental scales: Finding solutions for global issues. *Soil Science Society of America Journal*, 4:1201-1213.
- Kempen B., D.J. Brus G.B.M. Heuvelink and J.J. Stoorvogel. 2009. Updating the 1:50,000 Dutch soil map using legacy soil data: A multinomial logistic regression approach. *Geoderma*, 151:311-326.
- Mermut A. R. and Eswaran H. 2001. Some major developments in soil science since the mid-1960s. *Geoderma*, 100: 403-426.
- Minasny B. and McBratney A.B. 2015. Digital soil mapping: A brief history and some lessons. *Geoderma*. In Press.
- Rossiter D. 2004. Digital soil resource inventories: status and prospects. *Soil Use and Management*, 20: 296-301.
- Vaysse K. and Lagacherie P. 2015. Evaluating Digital Soil Mapping approaches for mapping GlobalSoilMap soil properties from legacy data in Languedoc-Roussillon (France). *Geoderma Regional*, 4: 20-30.



## چهاردهمین کنگره علوم خاک ایران - سخنرانی‌های کلیدی

### "پرسشنامه"

۱. اگر قرار باشد شما به عنوان خاکشناس، مطالعات خاکشناسی بخش وسیعی از ایران را انجام دهید، صرف نظر از تمامی معایب و محاسنی که هر کدام يك از روش‌های نقشه‌برداری دارند کدام روش را انتخاب می‌کنید؟  
(الف) سنتی  
(ب) مدرن (رقومی)
۲. آینده‌ی نقشه‌برداری در کشور را چگونه تصور می‌کنید؟  
(الف) روش‌های نوین در حد پایان‌نامه‌های دانشجویی باقی می‌ماند.  
(ب) پژوهشگران و مسئولان ذیربط به این نتیجه می‌رسند که روش سنتی قبل را دنبال کنند.  
(ج) انتظار بر این است که در آینده نزدیک، شاهد تغییر در مدیریت صحیح منابع با توجه به داده‌های حاصل از روش‌های نوین باشیم.  
(د) حداقل در آینده نزدیک به دلیل عدم برنامه‌ریزی و یا کمبود بودجه، اقدام مثبتی در زمینه نقشه‌برداری صورت نمی‌گیرد و نقشه‌برداری اولویت در کشور نخواهد بود.
۳. به نظر شما مهم‌ترین منبع خطایی که در نتایج حاصل از روش‌های نوین می‌تواند وجود داشته باشد حاصل از کدامیک از موارد زیر است؟  
(الف) تعداد نمونه ناکافی  
(ب) تجربه‌ی کارشناس در فرآیند مدلسازی  
(ج) عدم دقت داده‌های حاصل از مرحله‌ی صحرایی و آزمایشگاه  
(د) عدم تجربه‌ی نقشه‌بردار و به‌طور کلی دیدگاه آن در رابطه با منطقه‌ی مورد مطالعه
۴. از دیدگاه شما مهم‌ترین اولویت و چالش تحقیقاتی در روش‌های نوین نقشه‌برداری خاک کدام است؟  
(الف) نحوه تعیین تعداد نمونه  
(ب) اندازه پیکسل خروجی و مقیاس ارائه نقشه‌ها  
(ج) تعیین نوع داده‌های محیطی مورد استفاده  
(د) قبل از نیاز به برطرف کردن محدودیت‌هایی که در این روش وجود دارد، آموزش و تربیت کارشناسان خبره از نظر تئوری و عملی، مهم‌تر می‌باشد.  
(ه) همه موارد فوق هنوز دارای ابهام بسیاری است و بایستی مطالعات بیشتری برای تعیین دستورالعمل در مورد همگی آنها صورت پذیرد.



## Using the HEMC method in soil research

A.I. Mamedov

Institute of Botany, and Institute of Soil Science & Agrochemistry, ANAS, Baku Azerbaijan

### Abstract.

Studying and quantification the effects of management practices on soil structure is important for the development of effective soil conservation practices to minimize soil degradation. The effects of the soil properties and treatments on soil structure stability were investigated using the high energy moisture characteristic (HEMC) method and soil-HEMC model. Structure stability was inferred in quantitative terms from changes in the water retention curves at low matric potential ( $0-5 \text{ J kg}^{-1}$ , macropores  $> 60 \mu\text{m}$ ). The S-shaped water retention curves were characterized by the modified VG model that provided: (i) the model parameters and  $n$ , which represent the location of the inflection point and the steepness of the water retention curve, respectively; and (ii) the soil structure index,  $SI = \text{VDP}/\text{MS}$ , where VDP is the volume of drainable pores, and MS is the modal suction. Evaluation of the behavior of the SI, , and  $n$  parameters produced a clearer picture of the contribution of soil properties and management (spatial and temporal variation) on pore size (e.g. apparent aggregate size) distribution, and thus to soil structure stability. HEMC approach can identify, characterize and predict, in quantitative terms, the changes in the soil structure and shed light on the mechanisms responsible for the observed changes, and can be used in the relevant models.

**Keywords:** soil aggregate and structure stability, VG model parameters, macroporosity, near saturation, soil properties

### Introduction

Soil structure is a basic property of soil fertility and health. The formation of soil aggregates and structure is the result of biotic and abiotic factors and their interaction. It is critical for understanding the influence of soil structural condition on the water and nutrient regime in the root zone and crop yield, as well as on soil hydraulic properties, transport processes in the vadoze-zone, and surface runoff generation and soil erosion. Therefore studying the effects of soil properties and agricultural management practices on soil structure is important for the development of effective soil and water conservation, integrated nutrient management practices, and modeling tools in order to avoid risks of soil deterioration (Connolly, 1998; Amezketa, 1999; Ahuja et al., 2006).

Tillage and soil reconsolidation, crop rotation and amendment application can change soil bulk density and porosity, and subsequently affect physical and chemical properties of soils, drainage capacity and nutrients availability. Moreover, plant growth and soil biota's activities interact with environmental variables such as dry-wet and freeze-thaw cycles to modify soil structure. The ability to study soil structure dynamics and affecting mechanisms thereon are complicated by the next aspects: (i) the magnitude of temporal variability are affected considerably by the spatial location and growing season, (ii) the spatial and temporal variability often overshadow the effects of particular management practices, and (iii) to the difficulty involved in relating results from laboratory measurements of soil structure stability to actual field behavior. Thus transfer of effects of a given treatment from one location to another could prove problematic (Kay and Angers, 2002; Strudley et al, 2008).

The purpose of soil structure stability tests is to give a reliable description and ranking of the behavior of soils when subjected to forces of the environmental and management factors. Characterization of soil aggregate stability has been examined in numerous studies, though aggregate is not a replacement of soil structure. The relationship between soil structure and water content can be illustrated by the water retention curve. Yet, the difficulty to quantify the impact of soil type, properties and conditions, coupled with management practices, on soil water retention at near saturation and structure stability, neither by empirical nor by conceptual models, has been widely

recognized. The complexity also is associated with variety of physical and physicochemical mechanisms of soil aggregates breakdown by water (Roger-Estrade et al., 2008; Levy and Mamedov, 2013). Several aggregate stability methods, utilizing diverse primary breakdown mechanisms (e.g. wet sieving, drop test, application of ultrasonic energy, etc.), are used for establishing an index of soil structure, and thus making the comparison of the treatments difficult. The new one, the modified high energy moisture characteristic (HEMC) method and model (Pierson and Mulla, 1989; Levy and Mamedov, 2002) is sensitive and capable of detecting even small changes in structure stability of a range of soils from arid and humid zones (e.g. review paper by Mamedov and Levy, 2013). In this method, structure and aggregate stability is inferred from changes in the water retention curves at low matric potential or pore size distribution (PSD) following wetting. The **objective** of current study is characterization (case studies) of soil structure stability indices, collected from mostly semi-arid regions, using the HEMC method and the relationship between soil SI and the parameters of the modified VG equation

### Materials and Methods

**HEMC method.** Water retention, structure stability of soil samples was determined, and model parameters were calculated using a modified version of the HEMC method and soil-HEMC model (Pierson and Mulla, 1989; Levy and Mamedov, 2002; Mamedov and Levy, 2013). Briefly, in this method, macroaggregates (0.5 to 1.0 mm) is placed in a funnel (60 mm i.d.) with a fritted disc (pore size 20–40  $\mu\text{m}$ ) to form a bed ~5mm thick and is wetted from the bottom in a controlled manner, either slowly (2 mm h) or rapidly (100 mm h), with a peristaltic pump, and then a soil water retention curve at high energies of matric potential from 0 to  $-5 \text{ J kg}^{-1}$  (0 to 50 cm  $\text{H}_2\text{O}$ ) corresponding to drainable pores (macropores of 60 to 2000  $\mu\text{m}$ ) with small steps of  $0.1\text{--}0.2 \text{ J kg}^{-1}$  (1–2 cm), is performed. Soil structure stability indices is obtained from changes in the soil PSD following wetting (Fig. 1).

Soil structure stability can be expressed in terms of structural index (SI) or stability ratio. For a given wetting rate, the SI is defined as the ratio of volume of drainable pores (VDP) to modal suction (MS). The MS corresponds to the matric potential ( $\psi$ ,  $\text{J kg}^{-1}$ ) at the peak of the specific water capacity curve ( $d\theta/d\psi$ ) and corresponds to the most frequent pore size. The VDP, an indicator of the quantity of water released by a soil over the range of applied suctions, is defined as the integral of the area under the specific water capacity curve (Fig. 1). The stability ratio is the ratio of the SI indices obtained from fast and slow wetting. Use of only the SI for a given treatment, or the ratio of the SI obtained from treatments A to B (e.g. same wetting condition), S-shape soil quality index, and relative SI is generally employed too (Pierson and Mulla, 1989; Dexter, 2004; Mamedov et al., 2010; Hosseini, 2015).

**Structure indexes and model parameters.** Soil-HEMC model (Mamedov and Levy, 2013), which enabled an accurate fit of the water retention curves ( $\theta$ , 0 to  $-5 \text{ J kg}^{-1}$ ) for a wide variety of soils ( $R^2 > 0.99$ ), was used to calculate structural indexes and model parameters. The products of the Soil-HEMC model (the input data are the  $\theta$  and  $\psi$ ) include: VDP and MS, and model parameters:  $\theta_r$  and  $\theta_s$ ,  $n$ , A, B and C, and indices of the model accuracy:  $R^2$ , LSD, and RMSE. The VDP and MS, and  $n$  were calculated by the following model (van Genuchten, 1980; Mamedov and Levy, 2013):

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[ 1 + (\alpha \psi)^n \right]^{(1/n-1)} + A\psi^2 + B\psi + C \quad [1]$$

$$d\theta/d\psi = (\theta_s - \theta_r) \left[ 1 + (\alpha \psi)^n \right]^{(1/n-1)} (1/n - 1)(\alpha \psi)^n n \left[ \psi(1 + (\alpha \psi)^n) \right] + 2A\psi + B \quad [2]$$

where,  $\theta_r$  and  $\theta_s$  are the residual and saturated water content, respectively;  $\alpha$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) and  $n$  represent the location of the inflection point and the steepness of the S-shaped water retention curve; A, B and C are the coefficients of the polynomial.

**Pore and aggregate size relation.** The drainable pores studied in the HEMC method can be divided to three group sizes: macropores ( $>250 \mu\text{m}$ ), mesopores (125–250  $\mu\text{m}$ ), and micropores (60–125  $\mu\text{m}$ ) which empty under suction of 0–1.2, 1.2–24, and 2.4 to 5.0  $\text{J kg}^{-1}$  respectively. Hence, one can define three apparent size classes of aggregates (e.g., apparent macro- meso- and micro-aggregates) which correspond to the aforesaid three pore sizes. As a result of the direct link between aggregate size and pore size, observed differences between water retention curves can be used to identify which group size of pores, and thus the associated apparent aggregates' size, had been affected by a given treatment. Furthermore the change in  $\alpha$  and  $n$  is considered to be related to pore-size distribution, and therefore to aggregate and particle size distribution, and thus may characterize the contribution of aggregates size to soil structure condition (Lipiec et al., 2007; Mamedov and Levy, 2013).

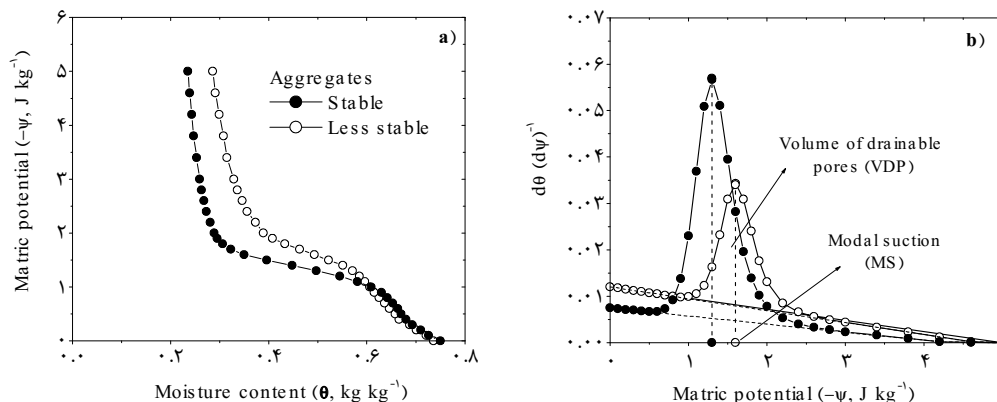


Figure 1. (a) moisture release, and (b) specific water capacity curves for stable and less (non) stable soil aggregates. The dashed line at the bottom of the specific water capacity curves represents the soil shrinkage lines for the treatments.

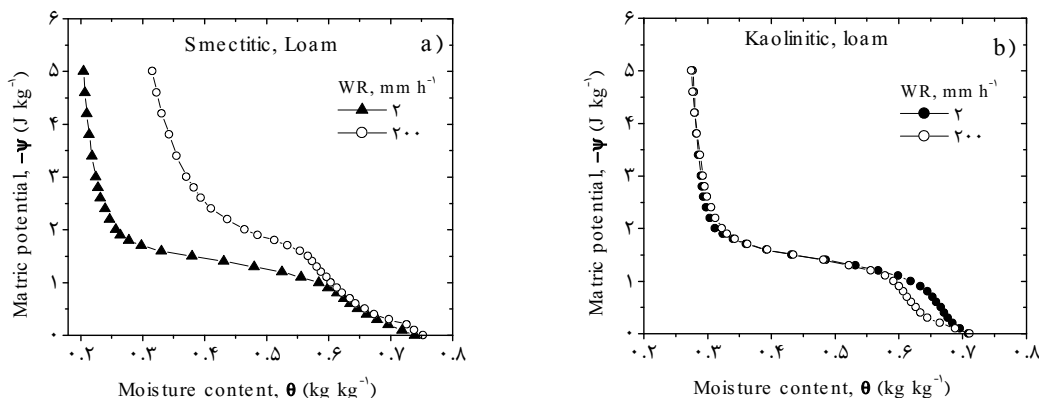


Figure 2. Soil water retention curves as affected by wetting rate (WR) and clay mineralogy : a) smectitic and b) kaolinitic loam (USA).

## Results and Discussion

**Wetting rate (soil condition).** Changes in soil structure following aggregate breakdown (irrigation, tillage, management, etc), generally, result in the formation of a larger number of aggregates or particles of smaller sizes than the original ones. This in turn, causes the inter-aggregate or particle PSD to shift towards a greater number of smaller pores (Fig. 2, Table 1). Increasing the wetting rate increased MS, and  $n$ , and decreased  $\psi$ , VDP and SI substantially. The smectitic soil were found to be much more sensitive to slaking and to a change in PSD than the kaolinitic one. In the smectitic soil, with weaker aggregates, the range of change in PSD was much wider (60–1000  $\mu\text{m}$ ) than in the kaolinitic soil ( $> 250 \mu\text{m}$ ). The considerable effect of clay type on soil structure could be explained by the nature of the clay minerals and their association with iron oxides, slaking or dispersion potential (Mamedov and Levy, 2013).



## چهاردهمین کنگره علوم خاک ایران - سخنرانی‌های کلیدی

Table 1. HEMC soil structural indices and model parameters as affected by treatments (MS-modal suction; VDP-volume of drainable pores; SI-structural index, and  $n$  represent the location of the inflection point and the steepness of the water retention curve). In all cases, within the each treatment and soil, the difference between the mean of MS, VDP, SI,  $n$  and of the treatments were significantly different at  $P < 0.05$ .

Treatments	Soil	WR mm h <sup>-1</sup>	MS cm	VDP g g <sup>-1</sup>	SI cm <sup>-1</sup>	$n$	cm <sup>-1</sup>
Wetting rate (WR)							
Kaolinitic	Loam	2	12.6	0.310	0.025	7.96	0.078
		100	14.6	0.214	0.015	10.48	0.068
Smectitic	Loam	2	14.5	0.184	0.013	9.84	0.068
		100	17.7	0.085	0.005	14.82	0.056
Tillage							
Conventional tillage	Loam	100	17.7	0.110	0.006	13.84	0.056
Non-tillage (>10 years)		100	15.5	0.163	0.011	13.42	0.064
Rhizosphere							
Control (bulk soil)	Loam	100	17.3	0.138	0.0080	10.22	0.057
Rhizosphere soil (wheat)		100	19.8	0.068	0.0035	13.19	0.050
Humic acid							
Control (non treated)	Loam	100	16.9	0.170	0.010	8.86	0.058
Humic acid (2%)		100	13.3	0.259	0.019	8.50	0.074
Sodicity (ESP)							
Control (ESP2)	Clay	100	12.5	0.168	0.0134	9.42	0.079
Sodic soil (ESP 10)		100	15.1	0.097	0.0064	14.80	0.066
Water quality							
Distilled water	Loam	100	25.6	0.018	0.001	30.21	0.039
Tap water (EC 0.5 dS/cm)		100	18.1	0.073	0.004	17.83	0.055
Polyacrylamide (PAM)							
Control (non treated)	Clay	100	13.7	0.205	0.015	10.32	0.072
Polyacrilamide (100 mg L <sup>-1</sup> )		100	12.1	0.316	0.026	9.96	0.082

**Long term tillage (> 10 y).** Differences in the water retention curves between the non-tilled and conventionally tilled loam soil aggregates were mostly in the matric potential range of 0 to  $-1.2 \text{ J kg}^{-1}$ , and lesser degree in the range of  $1.2$  to  $-2.4 \text{ J kg}^{-1}$ , corresponding to differences in macro-, and meso-pores ( $>250 \mu\text{m}$ ;  $125\text{--}250 \mu\text{m}$ ). In the clay soil notable differences occurred in the matric potential range of 0 to  $-5.0 \text{ J kg}^{-1}$ , corresponding to the available macro pore size ( $> 60 \mu\text{m}$ ), and hence apparent aggregate size (Fig. 3, Table 1). Aggregates from a non-tilled field exhibited much lower MS,  $n$  and higher VDP and value than the aggregates from long term tilled fields, which turned into up two fold higher SI mean in the former. In the coarser textured loam, aggregate stabilization was attained mainly by the presence of the coarser fraction of organic matter (e.g., plant roots and fungal hyphae), whereas in the clay soil cementing of aggregates was obtained not only by organic matter but also by the presence of high clay content (Amezketá. 1999).

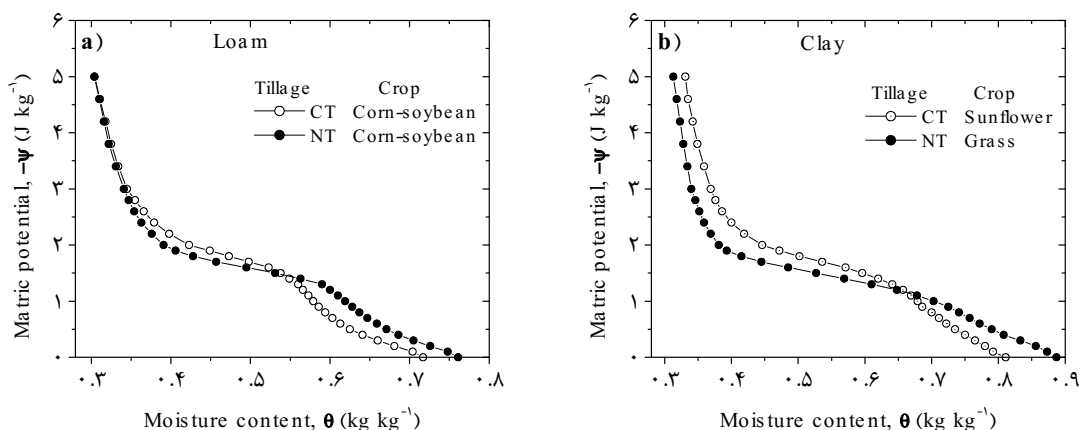


Figure 3. Soil water retention curves as affected by tillage history : a) loam tilled (CT) and non-tilled (NT) under corn-soybean (USA), and b) clay tilled (CT) under sunflower and non-tilled (NT) under grass (Turkey).

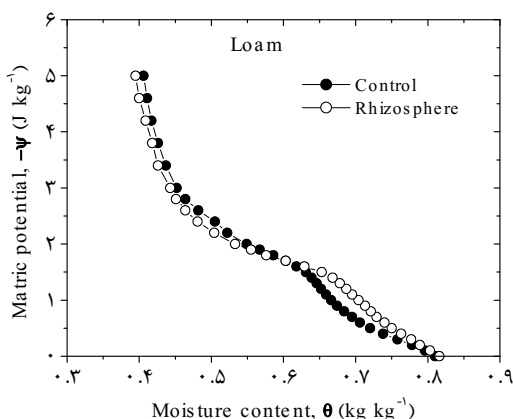


Figure 4. Water retention curves of loam soil aggregates : control (bulk) and rhizosphere soil under the wheat (Turkey)

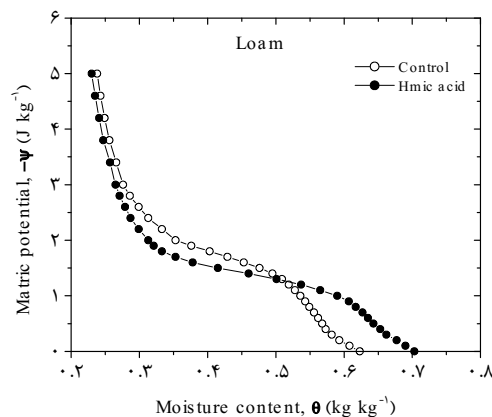


Figure 5. Water retention curves of loam aggregates : control (non treated) and treated with humic acid (Turkey)

**Rhizosphere.** The rhizosphere soil is directly influenced by the crop root, plant residues, rhizodeposition, root secretions (proteins and sugars, etc.) and symbiotic associations of plants with microorganisms (e.g. mycorrhizal fungi, etc.). All effects on soil physical, chemical and biological properties and hence influences on soil aggregation (Hosseini, 2015). In comparison with bulk soil, the rhizosphere soil used under the wheat notable improved soil water retention mostly at the range of 0 to  $-1.2 \text{ J kg}^{-1}$  ( $>250 \mu\text{m}$ ), and enhanced macropores and structure stability significantly (Fig. 4, Table 1).

**Humic acid.** Effect of humic acid treatment on soil water retention and structural indices were similar to the effect of non-tillage application, i.e. treatment significantly increased VDP, SI and  $\alpha$ , and decreased MS and  $n$ . Water retention curves of the treated and the non-treated loam aggregates were differed mostly in the matric potential range of 0 to  $-1.2 \text{ J kg}^{-1}$  and lesser degree at  $-1.2$  to  $-2.4 \text{ J kg}^{-1}$ , matching to differences in macro-, and



meso pores ( $>250$  and  $125-250 \mu\text{m}$ ) and apparent macro-, and meso-aggregates (Fig. 5, Table 1). Application of humic acid coats bridge between soil clay platelets, and similar to the effect of hydrophobic humic substances, improve structure stability and aggregate resistance to slaking by water (Piccolo and Mbagwu, 1999).

**Sodicity (ESP).** Soil sodicity, sodium adsorption ratio, and electrolyte concentration of the soil solution play a significant role in determining soil physical properties and the response of soil clays to slaking, dispersion and swelling (Levy et al., 2003). The effect of sodicity on clay soil water retention was considerable at a matric potential range of  $> -1.2 \text{ J kg}^{-1}$ , corresponding to meso- and micro-pores ( $< 250 \mu\text{m}$ ). The increase in soil sodicity, increased MS and  $n$ , and considerable degraded VDP, SI and (Fig. 6, Table 1). Sodicity associated with the fast wetting decreased the amount of macro-aggregates and thus the size of drainable pores. For the non sodic soil slaking by swelling has a minor role, whereas, for the sodic soil both swelling and dispersion emerged as main mechanisms for the aggregates breakdown (Levy et al., 2003).

**Water quality.** Similar to the effect of the sodicity, the variance in the semi-arid clay soil water retention curves between the treatments (control and tap water) occurred at the drier end of curve, i.e. at matric potential ranges of  $-1.2$  to  $-2.4 \text{ J kg}^{-1}$ , and  $-2.4$  to  $-5.0 \text{ J kg}^{-1}$ , associated with meso- and micro- pores ( $60-250 \mu\text{m}$ ). Use of tap water decreased the effect of potential dispersion and differential swelling on aggregate slaking during the wetting (Levy et al., 2003). Increase in water salinity improved VDP, SI and , and declined MS and  $n$  (Fig. 7, Table 1), e.g. improved amount of larger pores between, and possibly within, the apparent meso- and micro-aggregates of the soil. Manipulation with the chemo-physical properties of the clay size fraction (by changing ESP and water quality) seems to affect the stability and size fraction of the apparent meso- and micro-aggregates (Levy et al., 2003).

**Polyacrylamide (PAM).** Anionic PAM-treated soil aggregates were more stable than the non-treated aggregates, with the effect being more pronounced in the loam. Differences in the retention curves between the treated and the non-treated aggregates were noted in the matric potential range of  $0$  to  $-1.2 \text{ J kg}^{-1}$  mostly for clay and  $0$  to  $5.0 \text{ J kg}^{-1}$  for loam. Treating aggregates with PAM significantly increased VDP, SI, , and decreased MS and  $n$ . (Fig. 8, Table 1). In the loam PAM improved the entire range of aggregates (macro-, meso-, micro), whereas in the stable clay soil this variety was smaller (Mamedov et al., 2010).

**Link between soil SI and the model parameters.** The shape of the soil water retention (at near saturation) depend on soil aggregate and PSD and can be strongly influenced by management. The change in and  $n$  is considered to be related to PSD and therefore to aggregate and particle size distribution. If model parameters can be related to measured soil properties, then soil water retention can be derived from measured field properties (Dexter, 2004; Mamedov and Levy, 2013). Used published data reported of a wide range of changes in PSD, and structure stability indices of semiarid soils widely varying in intrinsic properties and management histories. A strong exponential relationship between the SI and the parameters and  $n$ , was noted (Fig. 9). It was established that the parameters and  $n$  ( $\Psi_r$ ,  $0$  to  $-5.0 \text{ J kg}^{-1}$ ), can characterize the contribution of large ( $>0.25-0.5 \text{ mm}$ ) and small ( $<0.25-0.5 \text{ mm}$ ) aggregates / particles to soil structure condition (Mamedov and Levy, 2013).

چهاردهمین کنگره علوم خاک ایران - سخنرانی‌های کلیدی

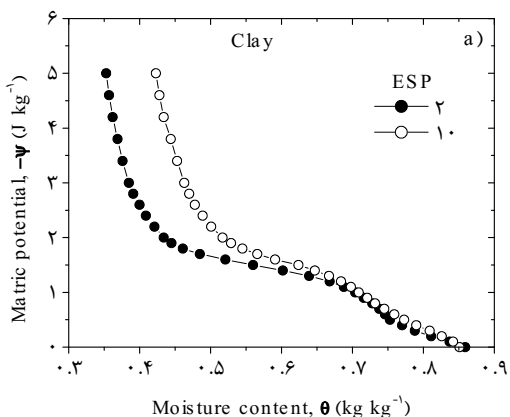


Figure 6. Clay soil water retention curves as affected by sodicity: ESP2 = non sodic, and ESP10 = sodic soil (Azerbaijan)

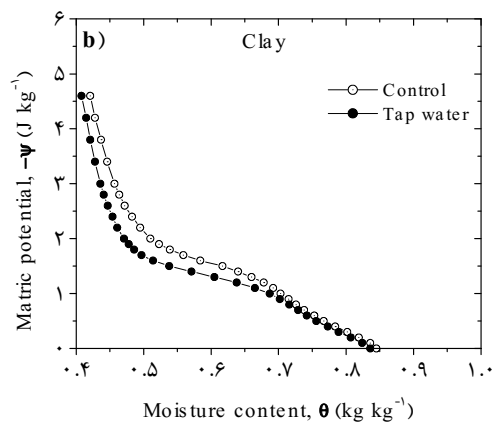


Figure 7. Clay soil water retention curves as affected by water quality: control (rain) and tap (irrigation) water (Azerbaijan)

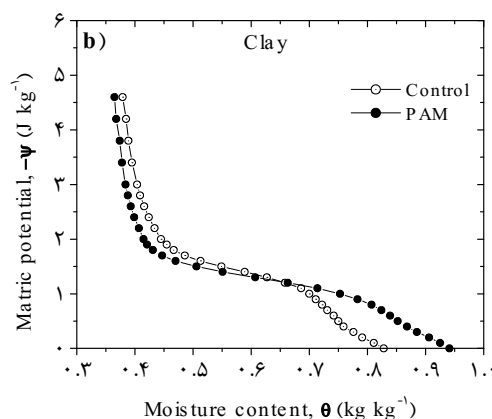
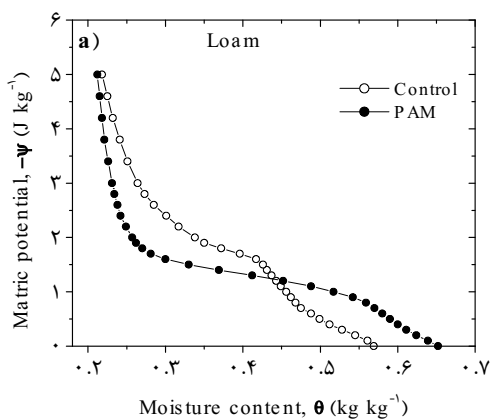


Figure 8. Soil water retention curves as affected by polyacrylamide (PAM) treatment: (a) loam and (b) clay soils (USA)

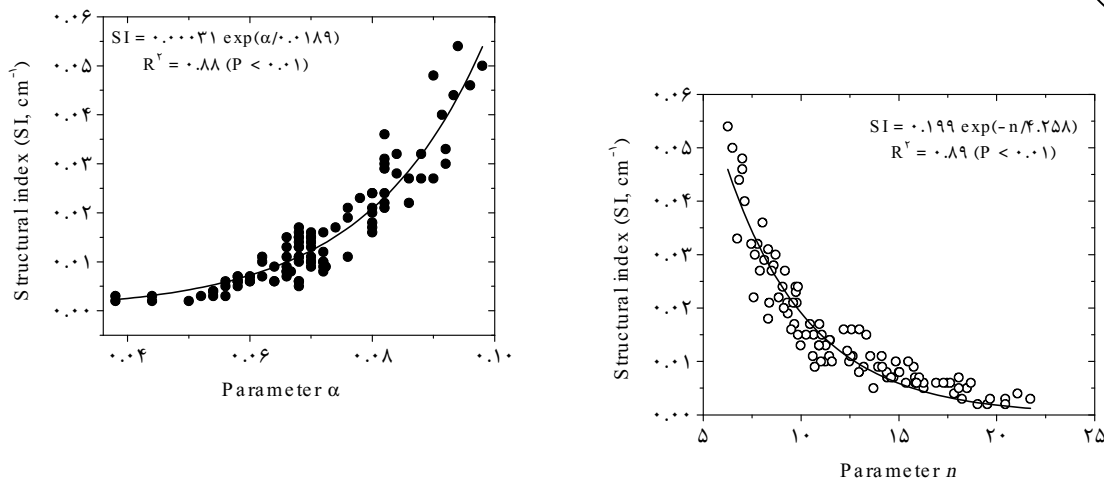


Figure 9. Semi-arid soil structural index (SI) as a function of the model parameter  $\alpha$  and  $n$

### Conclusion

The aggregate size distribution and pore structure of cultivated soils can be influenced by management (e.g., irrigation, tillage), but the resilience of the structure largely depends on soil genesis and properties. If model parameters can be related to measured soil properties and or condition, then soil water retention at near saturation can be derived from measured field properties. The paper presents and discusses results obtained from studies, in which the HEMC method and the model (Soil-HEMC) were employed. Soil structure stability was characterized in terms of changes in macro pore size distribution obtained from water retention curves at near saturation ( $\psi$ , 0 to  $-5 \text{ J kg}^{-1}$ ). An improved description of the water retention and its link to pore- and aggregate size distribution, by using the model parameters  $\alpha$  and  $n$  can assist in (i) the selection of management practices for obtaining the most suitable type of aggregation depending on the desired soil function or soil type, and (ii) connecting the soil pore system to water storage and transmission in cultivated soils. Introducing indices and parameters in soil-crop models may help in better understanding and linking the effects of changes in soil structure on soil hydraulic properties, erosion potential and crop yield.

### References

- Ahuja, L.R., L. Ma, and D.J. Timlin. 2006. Trans-disciplinary soil physics research critical to synthesis and modeling of agricultural systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 311-326.
- Amezketta, E. 1999. Soil aggregate stability: A review. *J. Sust. Agric.* 14: 83-151
- Connolly, R.D. 1998. Modelling effects of soil structure on the water balance of soil-crop systems: a review. *Soil Tillage Res.* 48:1-19
- Dexter, A.R. 2004. Soil physical quality: part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120: 201-214
- Hosseini, F., M.R. Mosaddeghi, M.A. Hajabbasi, M.R. Sabzalian. 2015. Influence of tall fescue endophyte infection on structural stability as quantified by high energy moisture characteristic in a range of soils. *Geoderma* 249-250: 87-99
- Kay, B.D., and D.A. Angers. 2002. Soil structure. In *Soil Physics Companion* (pp. 249-295), CRC Press, Boca Raton, FL
- Lipiec J., R. Walczak, B. Witkowska-Walczak, A. Nosalewicz, A. S owinska-Jurkiewicz, C. S awinski. 2007. The effect of aggregate size on water retention and pore structure of two silt loam soils of different genesis. *Soil Tillage Res.* 97: 239-246.
- Levy, G.J., and A.I. Mamedov. 2002. High-energy-moisture-characteristic aggregate stability as a predictor for soil seal. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1603-1609.



## چهاردهمین کنگره علوم خاک ایران - سخنرانی‌های کلیدی

- Levy G.J., A.I. Mamedov, and D. Goldstein. 2003. Sodicty and water quality effects on slaking of aggregates from semi-arid soils. *Soil Sci.* 168 :552-562.
- Mamedov, A.I., L.E. Wagner, C. Huang, L. D. Norton, and G.J. Levy. 2010. Polyacrylamide effects on aggregate and structure stability of soils with different clay mineralogy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74 : 1720-1732.
- Mamedov A.I. and G.J. Levy (2013). High energy moisture characteristics: linking between some soil processes and structure stability. In: S. Logsdon, M. Berli, and R. Horn, (eds). *Quantifying and Modeling Soil Structure Dynamics: Advances in Agricultural Systems Modeling. Trans-disciplinary Research, Synthesis, Modeling and Applications.* SSSA, Inc. Madison, WI 3 : 41-74.
- Piccolo, A., S.C. Mbagwu. 1999. Role of hydrophobic components of soil organic matter in soil aggregate stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63 :1801-1810.
- Pierson, F.B., and D.J. Mulla. 1989. An improved method for measuring aggregate stability of a weakly aggregated loessial soil. *Soil Sc. Soc. Am. J.* 53 : 1825-1831.
- Roger-Estrade, J., G. Richard, A.R. Dexter, H. Boizard, S. de Tourdonnet, M. Bertrand, and J. Caneill. 2009. Integration of soil structure variations with time and space into models for crop management. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 29: 135-142.
- Strudley, M.W., T.R. Green, and J.C. Ascough. 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: state of the science. *Soil Till. Res.* 99:4-48.
- van Genuchten, M.Th. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44 :892-898.



## ارزیابی تناسب اراضی، چرا و چگونه؟

عبدالمحمد محنت کش

استادیار پژوهش مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری

### چکیده

در بندهای مختلف از اسناد بالادستی کشور بر لزوم توجه به توسعه پایدار و مدیریت جامع تأکید شده است. حدود ۸۰ درصد از اراضی قابل کشت آبی کشور دارای محدودیت‌های مختلف است که شناخت این محدودیت‌ها و از طرفی پتانسیل تولید اراضی کشور برای اختصاص هر نقطه از اراضی به بهترین کاربری، از اولویت‌ها است. در دنیا روش‌های مختلفی برای ارزیابی اراضی وجود دارد که روند تکاملی این روش‌ها از شیوه‌های کیفی به سمت شیوه‌های کمی است و بهترین این روش‌ها، روش‌هایی است که به صورت کمی ضمن اختصاص اراضی به بهترین کاربری، منابع اراضی را برای استفاده‌های آینده حفظ نماید. در سال‌های اخیر از مدل‌سازی در ارزیابی تناسب اراضی به خوبی استفاده شده است و با به کارگیری مدل‌های مختلف به ویژه مدل‌های هوشمند نتایج قابل قبولی به دست آمده است. این مقاله بر استفاده از داده‌های کمی و مدل‌سازی در ارزیابی تناسب اراضی و به کارگیری روش‌های نوین تأکید دارد.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی، مدل‌های هوشمند، شبکه‌های عصبی مصنوعی، منطق فازی

### مقدمه

بسیاری از اسناد بالادستی کشور از جمله قانون اساسی، سند چشم‌انداز بیست ساله، سیاست‌های کلی در دوره چشم‌انداز بخش کشاورزی و علم و فناوری بر این موضوع تأکید دارند که برای رسیدن به خودکفایی در تولید محصولات کشاورزی و تحقق توسعه پایدار مبنی بر دانائی در عرصه‌های اجتماعی، اقتصادی، فرهنگی و زیست‌محیطی کشور، بایستی به نحوی عمل گردد که ضمن ارتقای کیفیت زندگی، حقوق نسل‌های کنونی و آینده نیز محفوظ بماند. به منظور دستیابی به کشاورزی پایدار بایستی با مدیریت جامع حوضه‌های آبخیز و مناطق کشاورزی، روستایی و عشایری در جهت ارتقاء و توسعه روش‌های علمی و فنی نوین و بهره‌برداری پایدار منابع اراضی قدم برداشت.

یکی از مشکلات اصلی حال حاضر دنیا افزایش جمعیت و افزایش تقاضا برای تولید محصولات کشاورزی است. از طرفی کاهش سطح اراضی قابل استفاده به دلایل مختلف از جمله تغییر کاربری اراضی، شور شدن خاک‌ها، روند نزولی حاصلخیزی خاک، کاهش عناصر غذایی و مواد آلی خاک، ورود نهاده‌های مختلف اعم از ضایعات، فاضلاب‌ها، پسماندهای صنعتی، کودهای شیمیایی، آلی و زیستی مختلف به مزارع کشاورزی و کاهش کیفیت منابع آب آبیاری موجب غیر قابل استفاده شدن بسیاری از اراضی مناسب و دشواری افزایش سطح زیر کشت شده است. در این بین قوانین جامع حفاظت از منابع خاک و آب در کشور بر این دشواری‌ها افزوده است. در حال حاضر از ۱۶۵ میلیون هکتار اراضی کشور تنها ۵/۱۸ میلیون هکتار قابل کشت هستند که از این سطح تنها ۲۰ درصد اراضی فاقد محدودیت بوده و ۸۰ درصد اراضی دارای محدودیت‌های مختلف از جمله شوری، عمق، سنگریزه، آهک و ... هستند.

از سال ۱۳۳۲ تاکنون در سطح کشور مطالعات خاک‌شناسی زیادی انجام شده است که ماحصل آن نقشه‌های خاک، طبقه‌بندی اراضی برای آبیاری، قابلیت آبیاری و شوری و قلیائیت بوده است. با توجه به این که کاربرد اصلی نقشه‌های خاک در بخش کشاورزی استفاده از آنها در تعیین کاربری مناسب برای اراضی است و خاک یکی از اصلی‌ترین اجزای پنج‌گانه اراضی محسوب می‌شود، متأسفانه در این زمینه در سطح کشور اقدامات قابل توجهی انجام نشده است. خوشبختانه مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور در برنامه‌های آینده خود تهیه پایگاه ملی اطلاعات منابع خاک ایران را در دستور کار قرار داده و اطلاعات مطالعات متعدد خاک‌شناسی سطح کشور را به صورت کمی و در قالب یک بانک داده در اختیار کاربران قرار خواهد داد. در آینده نزدیک پژوهشگران و علاقه‌مندان علوم خاک قادر خواهند بود از این بانک اطلاعاتی، داده‌های مورد نیاز خود را برداشت نمایند. با وجود چنین داده‌های کمی محققین در گرایش‌های مختلف علوم خاک قادر خواهند بود از روش‌ها و تکنیک‌های نوین روز در جهت مدل‌سازی پارامترها، خصوصیات و کیفیت‌های مختلف خاک و همچنین مدل‌سازی عملکرد و تولید محصولات مختلف کشاورزی بهره‌گیرند.



### چرا ارزیابی تناسب اراضی؟

با توجه به این که اغلب متخصصین خاک شناسی کشور در بخش کشاورزی فعالیت داشته و در این زمینه مشغول به کار هستند، و از طرفی هدف کلان بخش کشاورزی افزایش تولید محصولات کشاورزی و رسیدن به خودکفایی پایدار در تولید محصولات کشاورزی است، هدف اصلی در انجام مطالعات خاک شناسی و تهیه نقشه های خاک، باید کاربردی کردن این نقشه ها در بخش کشاورزی و استفاده کاربردی از این نقشه ها باشد. طبق نظر سارما (۲۰۰۶) دو کاربرد مهم نقشه های خاک در ارزیابی اراضی شامل تعیین محدودیت هایی که تناسب اراضی را کاهش می دهند و همچنین تعیین موقعیت مکانی خطرات ناشی از تغییر در سطح اراضی است. از این رو لازم است از داده های نقشه خاک در جهت انجام مطالعات ارزیابی تناسب اراضی استفاده گردد تا از این طریق اراضی مناسب برای هر نوع کاربری اصلی تعیین و اراضی هر منطقه به بهترین و مناسب ترین کاربری اختصاص یابد. با انجام این عمل مدیریت مناسب برای اراضی هر منطقه پیشنهاد و توسط مدیران اجرایی کشور در هر منطقه اجرا و از تخریب منابع اراضی جلوگیری خواهد شد. علاوه بر آن مدیران اجرایی در اتخاذ تصمیم های صحیح یاری شده و مهم تر از آن منابع اراضی برای نسل های آینده محفوظ خواهند ماند.

با توجه به هدف کلان بخش کشاورزی، دلیل مهم دیگر در انجام مطالعات تناسب اراضی این که، در صورت انجام این مطالعات، اراضی با توجه به مشخصات و خصوصیات خود به کاربری مناسب و یا به کشت و کار محصول خاص اختصاص خواهند یافت و به همین دلیل بیشترین میزان تولید و به عبارت بهتر بیشترین عملکرد محصول را خواهند داشت. از طرفی با اختصاص اراضی به مناسب ترین کاربری، از توان منابع اراضی در حد استعداد و پتانسیل آن بهره برداری خواهد شد و از انحطاط و تخریب خصوصیات و کیفیت های اراضی جلوگیری شده و از این طریق هدف اصلی بخش کشاورزی که همانا تولید پایدار و خودکفایی دائمی محصولات کشاورزی است تأمین خواهد شد.

### مروری بر روش های پیشین ارزیابی اراضی

ارزیابی اراضی شیوه ای است که توسط آن می توان اراضی را براساس خصوصیات و پتانسیل ها و وجود یا عدم وجود محدودیت ها به منظور استفاده برای کاربری های مختلف طبقه بندی نمود. ارزیابی اراضی عبارت است از برآورد کارایی اراضی برای استفاده هایی که از قبل تعیین شده اند. در واقع ارزیابی اراضی بر این مفهوم استوار شده است که انواع استفاده دارای نیازهای متفاوتی هستند (ایوبی و جلالیان، ۱۳۸۵). روش های متعددی برای ارزیابی اراضی وجود دارد که خود سابقه تاریخی و روند تکاملی از شیوه های کیفی به شیوه های کمی دارند.

تا قبل از سال ۱۹۷۰ در بسیاری از کشورها، سامانه های ارزیابی اراضی براساس شرایط خاص هر کشور تهیه گردید که این امر باعث ایجاد اشکال در تبادل بین المللی اطلاعات شد. از جمله این سامانه ها می توان به سامانه طبقه بندی قابلیت اراضی امریکا<sup>۷</sup> که یک سیستم ۸ کلاسه بر مبنای مفاهیم قابلیت و محدودیت بود، اشاره کرد. روش امریکایی طبقه بندی اراضی برای آبیاری<sup>۸</sup> روش دیگر ۶ کلاسه بود که اراضی را برحسب خصوصیات به اراضی قابل کشت، اراضی قابل آبیاری و اراضی بارور طبقه بندی می نمود. در طول سال های ۱۹۵۴ تا ۱۹۷۰ در ایران کار بر روی تدوین روشی برای طبقه بندی اراضی انجام شد که نتیجه آن در قالب نشریه شماره ۲۰۵ مؤسسه تحقیقات خاک و آب و تحت عنوان روش ارزیابی اراضی ایرانی برای کشت آبی<sup>۹</sup> منتشر شد و اراضی را در یک سامانه ۶ کلاسه برای کشت آبی طبقه بندی می نمود. در این روش پارامترهای اقلیمی، اقتصادی و اجتماعی در نظر گرفته نمی شد. از این سامانه سال ها همراه با مطالعات خاک شناسی برای طبقه بندی اراضی در نقاط مختلف کشور استفاده شد.

ضرورت ایجاد نمود برای دست یابی به یک روش استاندارد در دنیا، چارچوب ارزیابی اراضی تهیه گردد. در سال ۱۹۷۶ اولین نسخه این چارچوب پس از جمع آوری نظرات دانشمندان کشورهای مختلف تحت عنوان نشریه شماره ۳۲ فائو منتشر گردید (مهاجر شجاعی، ۱۳۶۳). از آن پس سازمان خواروبار و کشاورزی جهانی راهنمای طبقه بندی و ارزیابی اراضی برای اهداف مختلف را ارائه نمود. از جمله می توان به راهنماهای طبقه بندی اراضی برای کشت آبی (نشریه شماره ۵۵ فائو)، برای کشت دیم (نشریه ۵۲ فائو)، برای جنگل (نشریه شماره ۴۸ فائو) و برای مرتع (نشریه شماره ۵۸ فائو) اشاره کرد.

یکی دیگر از سامانه های طبقه بندی اراضی که در مناطق زیادی به ویژه در اراضی غرقاب دنیا استفاده شده و هنوز هم مورد استفاده قرار می گیرد، روش طبقه بندی قابلیت حاصلخیزی اراضی<sup>۱۰</sup> است. این سامانه یک سیستم طبقه بندی عملی خاک است که به طور کمی و به منظور مدیریت حاصلخیزی خاک روی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی مهم خاک تأکید دارد (Tabi et al., 2013). این سامانه دارای دو سطح طبقه بندی می باشد. در سطح اول نوع بافت افق سطحی و زیر سطحی به عنوان تیپ خاک شناخته می شود و در سطح دوم علائم معرف بیان می شوند که نشانگر عوامل محدود کننده برای رشد گیاه محسوب می شوند.

<sup>7</sup> USDA Land Capability Classification (1950)

<sup>8</sup> USBR Evaluation Method (1951)

<sup>9</sup> Iranian Land Classification for Irrigation (1970)

<sup>10</sup> Fertility Capability Classification (1975...2003)



## چهاردهمین کنگره علوم خاک ایران - سخنرانی‌های کلیدی

روش ارزیابی پهنه بندی زراعی-اکولوژیکی<sup>۱۱</sup> دیگر روش ارزیابی اراضی است که مشابه دیگر روش های FAO، اراضی را برای کشت آبی و دیم طبقه بندی می کند. در این روش نیازهای اقلیمی و زمین و خاک گیاهان مختلف در نظر گرفته شده و نهایتاً یک پهنه بندی زراعی-اکولوژیکی ارائه می گردد. در این روش برای هر منطقه دوره رشد محاسبه شده و همچنین پتانسیل تولید محصولات مختلف براساس پتانسیل ژنتیکی و خصوصیات گیاهی هر رقم و با استفاده از داده های اقلیمی قابل محاسبه است. در سال های اخیر تولید پتانسیل به دست آمده با این مدل، با مقدار بیشترین تولید واقعی در مزارع بعضی نقاط دنیا هماهنگی نداشته و در بعضی موارد حتی کمتر از تولید واقعی است. محققین علت این مسئله را در پیشرفت های چشمگیر در زمینه اصلاح نژاد گیاهان و تولید ارقام با عملکرد بالا، و عدم شناخت کافی در پاسخ فیزیولوژیک برخی گیاهان به متغیرهای محیطی عنوان نموده اند (ایوبی و جلالیان، ۱۳۸۵).

پس از تدوین نشریه شماره ۳۲ و نشریات دیگر فائو، متخصصینی از جمله سایس، روش های عملی دیگر ارزیابی از جمله روش ارزیابی تناسب اراضی<sup>۱۲</sup> برای گیاه خاص را ارائه دادند (Sys et al., 1991؛ Sys et al., 1993). این روش دارای ساختار سلسله مراتبی از سطح رده تا واحدهای تناسب اراضی است. اساس این روش بر انطباق خصوصیات مختلف اراضی با نیازهای گیاه مورد نظر بنا گذاشته شد و از این طریق تناسب اراضی برای گیاه خاص کلاس بندی می گردد. هدف این روش تعیین اراضی مناسب برای کشت و پرورش گیاه خاص بوده و منظور از اراضی مناسب اراضی است که نیازهای اقلیمی و زمین و خاک محصول مورد نظر را برآورده نماید. در جلد سوم از دستورالعمل این روش جداول نیازهای اقلیمی و زمین و خاک برای محصولات عمدتاً زراعی ارائه گردید. با توجه به این که بیشتر محصولات ارائه شده در این جداول از نوع محصولات مناطق حاره ای بوده، و چون نیازهای این محصولات براساس نتایج حاصل از تحقیقات انجام شده در مناطق حاره ای است، بسیاری از این جداول در مناطق خشک و نیمه خشک دنیا کارایی نداشته و از این نظر ضعف بزرگ این روش محسوب می گردد. در دهه های اخیر این روش در قالب پایان نامه های دانشجویی و مطالعات تناسب اراضی توسط پژوهشگران مؤسسه تحقیقات خاک و آب در مناطق مختلف کشور انجام شد و در نتیجه این مطالعات مشکل اصلی این روش یعنی صحیح نبودن درجه بندی های جداول نیازهای گیاهی برای شرایط ایران، بیش از پیش مشخص گردید. از این رو این جداول توسط مؤسسه تحقیقات خاک و آب تا حدودی برای محصولات زراعی تعدیل گردید.

امروزه ضرورت ارائه روش های کمی و اقتصادی بیشتر از روش های کیفی و توصیفی برای ارزیابی اراضی احساس شده که البته این روش ها نیاز به داده های بیشتر و دقیق تری دارند. نیاز به کمی تر کردن روش های ارزیابی دلیلی بر انجام تحقیقات بیشتر به ویژه در پیش بینی کمی کیفیت های اراضی و تولید محصول خواهد بود.

### مدل سازی در ارزیابی تناسب اراضی

یکی از روش های نوین در بررسی پاسخ اراضی به استفاده های مختلف، مدل سازی یا شبیه سازی کاربری مورد نظر است. یک مدل شکل ساده شده ای از واقعیت است که بعد از ایجاد آن می توان بدون اندازه گیری و آزمایش، رفتار یک پدیده را پیش بینی کرد (ایوبی و جلالیان، ۱۳۸۵). از این طریق با جمع آوری، ذخیره و پردازش ویژگی های زیادی در بُعد زمان و مکان، می توان عکس العمل اراضی را در مقابل هر نوع کاربری مدل کرد. در واقع با وارد کردن خصوصیات اراضی در مدل های مورد نظر، توان تولید آن اراضی را برآورد و از این طریق اراضی را طبقه بندی نمود. رزیتز (۲۰۰۳) این گونه مدل ها را در ارزیابی اراضی تحت عنوان مدل های بیوفیزیکی معرفی کرده است. در ارزیابی اراضی مهم ترین کاربرد مدل سازی، پیش بینی یا برآورد مقدار محصول است. ایده اصلی در این مدل ها بر این مبناست که بین خصوصیات اراضی و تولید محصول ارتباطی وجود دارد که با ایجاد این ارتباط می توان مقدار تولید را برآورد کرد.

مدل های آماری را می توان ساده ترین مدل ها در ارزیابی اراضی دانست. با توجه به طبیعت مدل های آماری، این مدل ها برای مناطقی مناسب هستند که اطلاعات کافی از داده های ورودی و پاسخ گیاه (تولید) در دسترس باشد. بیشترین کاربرد این مدل ها در ارزیابی اراضی، پیش بینی تولید محصول و همچنین برآورد بعضی کیفیت های اراضی است (ایوبی و جلالیان، ۱۳۸۵). دروموند و همکاران (۲۰۰۳) با به کارگیری چندین روش برای پیش بینی عملکرد محصول، گزارش نمودند درک فرآیند تغییرپذیری عملکرد بسیار مشکل است چرا که فاکتورهای زیادی روی عملکرد تاثیر دارند. آنها چندین روش رگرسیون چندگانه خطی برای مدل کردن رابطه بین عملکرد ذرت و سویا با خصوصیات خاک استفاده کردند و نهایتاً چنین نتیجه گرفتند که روش های آماری ساده در درک تغییرپذیری عملکرد مفید نیستند. با توجه به اینکه روابط بین خصوصیات مختلف اراضی با عملکرد محصول خاص، روندی پیچیده و غیرخطی است (که خود منتج از اثرات متقابل خصوصیات اراضی است)، روش های آماری که روابط را به صورت خطی بررسی می نمایند در برآورد این رابطه توانایی کمی داشته و بسیاری از قوانین حاکم بر این روابط قابل استخراج نیست.

<sup>11</sup> Agro-Ecological Zoning (1970 ... 1996)

<sup>12</sup> Land Suitability Evaluation (1991)



## چهاردهمین کنگره علوم خاک ایران - سخنرانی‌های کلیدی

در مقابل تکنیک‌های هوشمند از جمله مدل‌های عصبی-فازی و شبکه‌های عصبی مصنوعی با توجه به ساختار تشکیلی خود این توانایی را دارند که رابطه موجود را تا حدود زیادی بصورت واقعی بیان نمایند (تاجیک و همکاران، ۱۳۹۱). شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توانند در جهت توسعه مدل‌های تجربی با پایه زراعی مورد استفاده قرار گیرند (Kaul et al., 2005). یونو و همکاران (۲۰۰۴) بیان نمودند اگر چه در مطالعات زیادی، شبکه‌های عصبی مصنوعی غالباً برای طبقه‌بندی داده‌ها استفاده شده است، اما این روش پتانسیل بالایی برای پیش‌بینی متغیرهای پیوسته نشان می‌دهد. این تکنیک هوشمند در چند سال اخیر کاربردهای مناسبی در علوم زیست محیطی، مهندسی و کشاورزی به خود اختصاص داده است. یونو و همکاران (۲۰۰۴) گزارش کردند از شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توان در تخمین مقدار رطوبت خاک، تخمین زیست توده و پیش‌بینی عملکرد نتایج دقیقی به دست آورد.

در سال‌های اخیر از سامانه جدیدی به نام ماشین‌های بردار پشتیبان<sup>۱۳</sup> در طبقه‌بندی و به نوعی در مدل‌سازی داده‌ها استفاده شده است. ماشین بردار پشتیبان یکی از روش‌های یادگیری با نظارت است که از آن برای طبقه‌بندی و رگرسیون استفاده می‌کنند. این روش از جمله روش‌های نسبتاً جدیدی است که در سال‌های اخیر کارایی خوبی برای طبقه‌بندی نشان داده است. در مهندسی کشاورزی و بیولوژی، علاقه رو به رشد در استفاده از SVMs نشان می‌دهد که اگر چه در طول چند سال گذشته تعداد مقالات مروری در مورد این موضوع افزایش نداشته، اما روند رو به رشد در تمام مقاله‌ها نشان می‌دهد که استفاده از این تکنیک پیشرفت قابل توجهی داشته است (محنت کش، ۱۳۹۱).

### روش‌های پیش‌رو در ارزیابی تناسب اراضی

با توجه به این که روند تکاملی ارزیابی اراضی از شیوه‌های کیفی به سمت شیوه‌های کمی است، و با عنایت به گسترش و توسعه مدل‌های مختلف در دنیا، روش‌های جدید سعی در برقراری ارتباط هر چه دقیق‌تر و صحیح‌تر خصوصیات اراضی با فاکتورهای مورد انتظار از اراضی دارند و چون در ارزیابی اراضی برای استفاده‌های کشاورزی، مهمترین ملاک، تولید یا عملکرد محصول مورد نظر در آن اراضی است، بنابراین بهترین روش ارزیابی روشی است که بتواند بین مشخصات اراضی که در تولید محصول دخالت دارند، با عملکرد و یا پتانسیل محصول ارتباط برقرار نماید.

اگر قرار است علم ارزیابی تناسب اراضی به موازات علوم دیگر به صورت کمی پیشرفت نماید، ناگزیر باید از مدل‌های مختلف در تعیین رابطه بین خصوصیات و کیفیت‌های اراضی با عملکرد محصول و یا کاربری مورد نظر بهره‌جست. با کمک این مدل‌ها که خود مبتنی بر موازنه جرم، روابط تجربی و توابع تبدیل خاکی هستند، و با استفاده از خصوصیات اراضی و خاک، کیفیت‌های اراضی و در نهایت میزان تولید محصول شبیه‌سازی می‌گردد و از این طریق اراضی برحسب توان تولید خود ارزیابی شده و طبقه‌بندی می‌شوند. شیوه‌های اکتساب داده‌های مزرعه‌ای مانند حفاری گودال و ترانسه کار بسیار پر زحمت و پرهزینه و مستلزم عملیات میدانی و انجام تجزیه‌های آزمایشگاهی گسترده هستند. این داده‌ها می‌توانند به طور مؤثر توسط مدل‌های خاک-زمین نما با استفاده از متغیرهای کمی تکمیل شوند و از این طریق باعث صرفه‌جویی در زمان، نیروی کار و هزینه‌ها گردند. از طرفی هزینه‌های زیاد جمع‌آوری نمونه‌های خاک، غیر قابل دسترس بودن برخی نقاط حوضه‌های آبخیز و هزینه‌های سنگین تجزیه نمونه‌های خاک، ارائه روش‌هایی را به منظور برآورد غیرمستقیم خصوصیات خاک طلب می‌کند. البته لازم است مدل‌های مختلف در شرایط مختلف اقلیمی، توپوگرافی، خاک، اجتماعی و اقتصادی مورد آزمون قرار گرفته و بسته به شرایط بهترین مدل‌ها انتخاب و مورد استفاده قرار گیرند.

### منابع

ایوبی، ش. و ا. جلالیان، ۱۳۸۵. ارزیابی اراضی (کاربردی‌های کشاورزی و منابع طبیعی)، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان.  
تاجیک، س.، ش. ایوبی و نوربخش، ف. ۱۳۹۱. برآورد فعالیت برخی آنزیم‌های خاک با استفاده از خصوصیات خاک و پستی و بلندی زمین در بخشی از اراضی تپه ماهوری سمیرم استان اصفهان، آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، شماره ۲۶ صفحه‌های ۷۵۳ تا ۷۶۱.

محنت کش، م. ۱۳۹۱. مدل‌سازی خاک-زمین نما و پیش‌بینی تولید گندم دیم به کمک مدل‌های مختلف در مناطقی از زاگرس مرکزی. رساله دکتری رشته خاک‌شناسی، دانشکده ی کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان.

مهاجر شجاعی م. ح. ۱۳۶۳. مبانی ارزیابی اراضی. سازمان خوار و بار جهانی. نشریه شماره ۶۵۵، موسسه تحقیقات خاک و آب.  
Drummond, S. T., K. A. Sudduth, A. Joshi, S. J. Birrell and N. R. Kitchen. 2003. Statistical and neural methods for site-specific yield prediction. T. ASAE. 46: 5-14.

Kaul, M., R. L. Hill, and C. Walthall. 2005. Artificial neural networks for corn and soybean yield prediction. Agricultural Systems, 85: 1-18.

<sup>13</sup> Support Vector Machines (SVM)



## چهاردهمین کنگره علوم خاک ایران - سخنرانی‌های کلیدی

- Rossiter, D. G. 2003. Biophysical models in land evaluation. Encyclopedia of life support system (EOLSS), EOLSS pub. UK.16pp.
- Sarma, V. A. K. 2006. Mapping of the soil. Science Publisher.
- Sys C. Van Ranst E. Debavey J. and F. Beernaert. 1993. Land evaluation, Part 3. Agricultural Publications7. General Administration for Development Cooperation, B russels, Belgium, 199 p.
- Sys, C.E. Van Ranst and J. Debaveye. 1991. Land Evaluation. Part I: Principles in Land Evaluation and Crop Production Calculations. General Administration for Development Cooperation. Agric. Pub. NO.7, Brussels, Belgium, 274p.
- Tabi, F. O., E. S. C. Ngobesing, G. S. Yinda, A. Boukong, M. Omoko, D. Bitondo, and Ze, A. D. Mvondo 2013. Soil fertility capability classification (FCC) for rice production in Cameroon lowlands. African Journal of Agricultural Research, 8(119): 1650-1660.
- Uno, Y., S. O. Prasher, R. Lacroix, P. K. Gelo, Y. Karimi, A. Viau and R. M. Patel. 2004. Artificial neural networks to predict corn yield from compact airborne spectrographic imager data. Computer Electronic Agriculture, 47: 149-161.
- Ziadat F. M. 2007. Land suitability classification using different sources of information: Soil maps and predicted soil attributes in Jordan. Geoderma, 140: 73-80.

### Abstract

In different sections of the states documents the necessity of sustainable development and management is stressed. About 80 percentage of irrigated arable land of country has different limitations that understanding the limitations and land potential production of the country to allocate anywhere in land to the best use, are priorities. In the world there are different methods for land evaluation that the evolution of these methods is qualitative to quantitative methods, and the best of these methods, are which while allocating land to the best use, protect land resources for future use. In recent years modeling has been used well to assess land suitability and using different models especially intelligent models are obtained satisfactory results. This article focuses on the use of quantitative data, modeling and application of new methods to land suitability evaluation.



## روش‌های نوین در خاک‌شناسی و تخمین‌گرهای خاک: از تئوری تا کاربرد

نورایر تومانیان<sup>۱</sup>، روح اله تقی زاده<sup>۲</sup>

۱- استادیار خاک‌شناسی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان ۲- استادیار خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان

### چکیده

چندی است که روش‌های رقومی پدومتری (محاسبات مکانیزه آماری و ریاضی) مطالعات متغیرهای وابسته به منابع طبیعی در حیطه علوم مختلف از جمله خاک‌شناسی در جهان رواج یافته است. روش‌هایی نوین پدومتریکی بسیاری برای انجام مطالعات پدولوژیکی (نقشه برداری، انجام مطالعات خاک‌شناسی، تشکیل و تکامل خاک‌ها) در جهان پیشنهاد شده است و برنامه‌های جهانی بسیاری تدوین و در حال اجرا می‌باشند. در فرآیندهای جاری جهانی تمامی کشورها به جز کشور ما ایران درگیر بوده و قرار است با هماهنگی‌های بین‌المللی نقشه‌های جهانی خاک‌ها آماده گردند. عدم قبول و استفاده از روش‌های مزبور، کشور را از مسیر جهانی خارج کرده و ما را در بعد جهانی منزوی می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: خاک‌شناسی، پدومتری، نقشه برداری خاک‌ها، روش‌های جدید، کاربرد.

### مقدمه

نقش خاک کره در طبیعت پیچیده بوده و در تحکیم و تداوم سیستم‌های زیستی در کره خاکی تعیین کننده است. لایه خاک بعنوان رکن اصلی طبیعت و فضای تعاملی ارکان سازنده محیط طبیعی، محل اجرای بیشتر کنش‌های طبیعت است. با توجه به خطر افتادن زندگی بشر و تحدید او بوسیله آلودگی و تخریب منابع، گرایش به مطالعات محیطی (مطالعات خاک‌ها) در دنیا افزون گشته و مرکزیت اصلی مباحثات و تجزیه و تحلیل‌های کمی با دقت زیاد و درجه اعتماد بالا را تشکیل داده است (مک برانتی و همکاران، ۲۰۰۰). مدیریت دقیق منابع احتیاج به داده‌های خیلی زیاد و دقیق و مورد اطمینان دارد و مدیریت موثر خاک‌ها مضافاً نیاز به درکی همه جانبه از چشم انداز و توزیع خاک‌ها دارد. طی دهه‌های اخیر، روش‌های عددی تجزیه و تحلیل کننده منابع محیطی و از آن جمله خاک‌ها در محافل علمی دنیا مورد توجه بسیار شده است این شاخه علمی نوین در حال رشد با نام کلی "خاک‌آمار"<sup>۱۴</sup> (پدومتریکی یا نقشه برداری رقومی خاک‌ها) معروف شده است. نقشه برداری رقومی خاک‌ها عبارت از بکارگیری روش‌های ریاضی و آماری برای درک تشکیل، تکامل و تغییرات مکانی و زمانی خاک‌ها و تجزیه و تحلیل خصوصیات، شناسایی رفتار آنها در طبیعت می‌باشد. توسعه این فضای علمی در حال رشد انعکاس بکارگیری تئوری مجموعه‌های فازی، زمین‌آمار، مدل‌های ریاضی و آماری و همچنین حاصل توسعه و اکتشافات تکنولوژیکی، مخصوصاً تکنیک‌های سنجش از دور و نزدیک و تکامل سخت‌افزاری و نرم‌افزاری کامپیوترها، و تکنیک‌های GIS می‌باشد (هنگل، ۲۰۰۲). باید مد نظر داشت که روش پدومتریکی برای ارتقاء و تکمیل روش‌های مطالعه و نقشه برداری مرسوم خاک‌ها و نه برای جایگزینی آن‌ها ارائه شده اند. در حقیقت متخصصان پدومتریکی باید در حلقه اول خاک‌شناسی ماهر و مجرب باشند تا بتوانند با شناخت ارتباط خاک - سرزمین مدل مناسبی اجرا و نتایج را بدرستی ارزیابی، تفسیر و اهداف مطالعات را جامع عمل ببوشانند. در این دنیای پر تلاطم که اقلیم و محیط در حال تغییرات دائم بوده و نفوس بشری پیوسته در حال تزايد می‌باشد، تهیه زیربنای تصمیم‌گیری، برنامه ریزی و مدیریت علمی دنیا و تأمین امنیت و سلامتی منابع خاکی، آبی و غذایی از اهم اهداف روش‌های رقومی خاک‌شناسی می‌باشند.

### مواد و روش‌ها

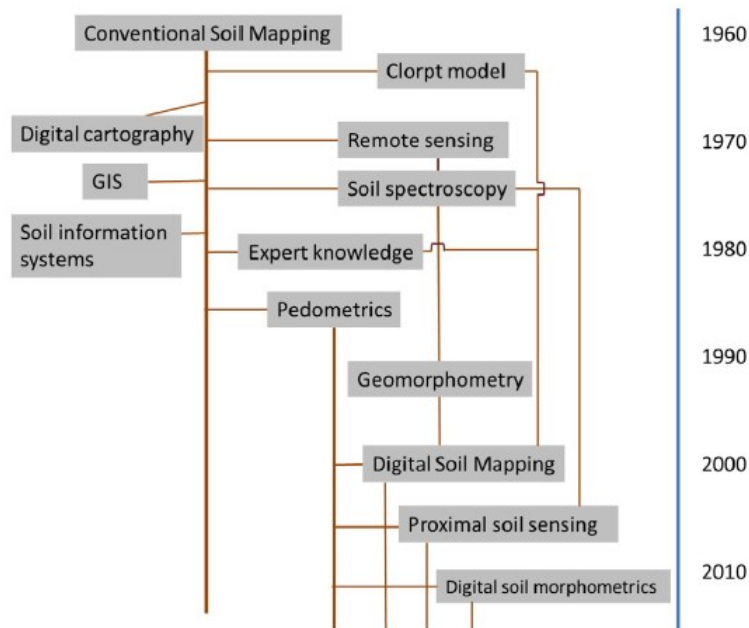
این مقاله کلیدی سعی در معرفی و ارائه پیشرفت و کاربرد روش‌های جدید نقشه برداری رقومی در بعد جهانی نگاشته می‌شود. از طرف دیگر تلاش دارد نمونه‌هایی از نتایج کاربرد آن‌ها در داخل کشور نیز ارائه نماید. لذا مواد استفاده شده در ارائه این مقاله کلیه مباحثات علمی و کاربردی در حال انجام در سطح مجامع بین‌الملل و داخل کشور می‌باشد. روش استفاده شده برای ارائه نتایج نیز دسته بندی انجام گرفته برای هرچه ساده تر کردن انگاشت پیشرفت‌های مختلف ایجاد شده در دیسپلین‌های مختلف می‌باشد، که در قسمت نتایج و بحث ارائه می‌گردد.

### نتایج و بحث

بینش کمی به مفاهیم پدولوژی در دهه ۶۰ میلادی در جهان نضج گرفته و مسیر تکاملی خود را از روش مرسوم خاک‌شناسی (شناخت و طبقه بندی خاک‌ها) تا نقشه برداری و تخمین مکانی پارامترها، خصوصیات و کلاس‌های خاک در سطح فعلی رسانیده است. فرآیند تکاملی این دیدگاه در برگیرنده پیشرفت‌هایی در بیان مفاهیم چگونگی تشکیل و تکامل خاک،

<sup>14</sup> - Pedometrics

مدل‌های تخمین مکانی وابسته‌های خاک، استفاده از شاخه‌های متفاوت علمی در قالب ساختارهای نرم‌افزاری و سخت‌افزاری می‌باشد (شکل ۱).

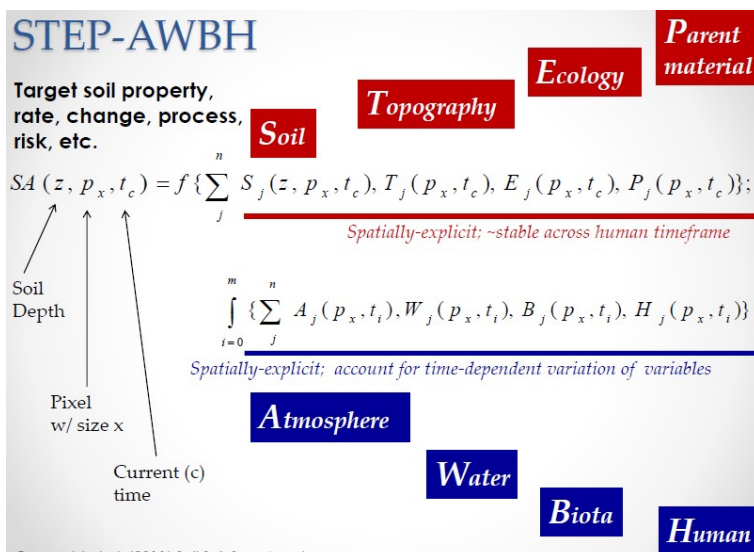


شکل ۱- دیاگرام نشن دهنده مسیر تکاملی و امتزاج مفاهیم علمی متفاوت در شکل‌گیری نقشه برداری رقومی در جهان کنونی

از حدود سال‌های آخرین دهه نود که پدومتری به صورت فعال مباحث خاک‌شناسی را با جامعیت بیشتری شروع نمود تا کنون گستردگی و همه‌گیری غیر قابل‌تصور را در جهان فیزیکی و علمی یافته است (Minasny and McBratney, 2015). در طول بیست و پنج سال اخیر تعداد بیشماری بر مقالات علمی این فضای علمی افزوده شده و از ۸ مقاله به تعداد ۹۰ مقاله در ماه رسیده است و همچنین تعداد ارجاعات علمی به این مقالات از ۵۰ مورد به ۱۵۰۰ ارجاع در ماه رسیده است (Minasny and McBratney, 2015). از نظر سطح مورد مطالعه و دقت مکانی نقشه‌های خروجی این نوع مطالعات از ۱۰۰۰ پیکسل به یکصد میلیارد پیکسل با دقت ۱۰۰ متری رسیده است به طوری که دغدغه فعلی این دیدگاه ارائه نقشه‌های خاک دقیق در سطح جهان می‌باشد.

#### الف - پیشرفت‌های مفهومی:

مدل‌های مفهومی تشکیل و تکامل خاک‌ها از مدل‌های فاکتورهای پنج‌گانه خاک‌سازی (شروع و با اضافه شدن فاکتورهای ذاتی خاک (نقشه‌های قدیمی خاک یا اطلاعات کسب شده از سنجش از دور یا نزدیک) و مختصات مکانی توسط مک برانتی و همکاران (۲۰۰۳) امکان تخمین مکانی متغیرها و کلاس‌های خاک در محیطی بزرگتر با دقت بیشتر فراهم آمد. در این مدل مفهومی امکان بازسازی مدل‌های مکانی وجود داشته و مکان و زمان تشکیل و تکامل خاک‌ها واضح و روشن ارائه می‌گردد. در مدل مفهومی جدیدتری که توسط گرانوالد و همکاران (۲۰۱۱) ارائه شده است، فرمول‌های بگونه‌ای توسعه داده شده است که متشکل از فاکتورهای ثابت در زمان (خاک، پستی بلندی، اکولوژی و مواد مادری) و متغیر در زمان (اتمسفر، آب، موجودات زنده و انسان) باشد و فاکتورهای خاک‌سازی جامعیت کاملی یافته و بجز چشم‌انداز اراضی اکوسیستم و محیط بزرگتری را تأثیرگذار بر تشکیل و تکامل خاک دانسته است. این مدل (STEP-AWBH) اجزاء خاک را در فضایی چهار بعدی مشخصی می‌نماید.



شکل ۲- فاکتورهای موثر بر تشکیل و تکامل خاک ها بر اساس مدل STEP-AWBH.

### ب- پیشرفت های کاربردی:

در بینش و فضای علمی جدید استاندارد و همسان کردن اطلاعات پروفیلی خاک ها، ایجاد ورودی های محیطی دقیقتر و کاراتر نمودن مدل های ترکیب کننده برای افزایش دقت نقشه های خاک خروجی رکن اصلی فعلیت ها می باشد. از جمله پیشرفت هایی که در بخش های مختلف نقشه برداری رقومی در دنیا ایجاد شده است می توان به موارد زیر اشاره نمود:

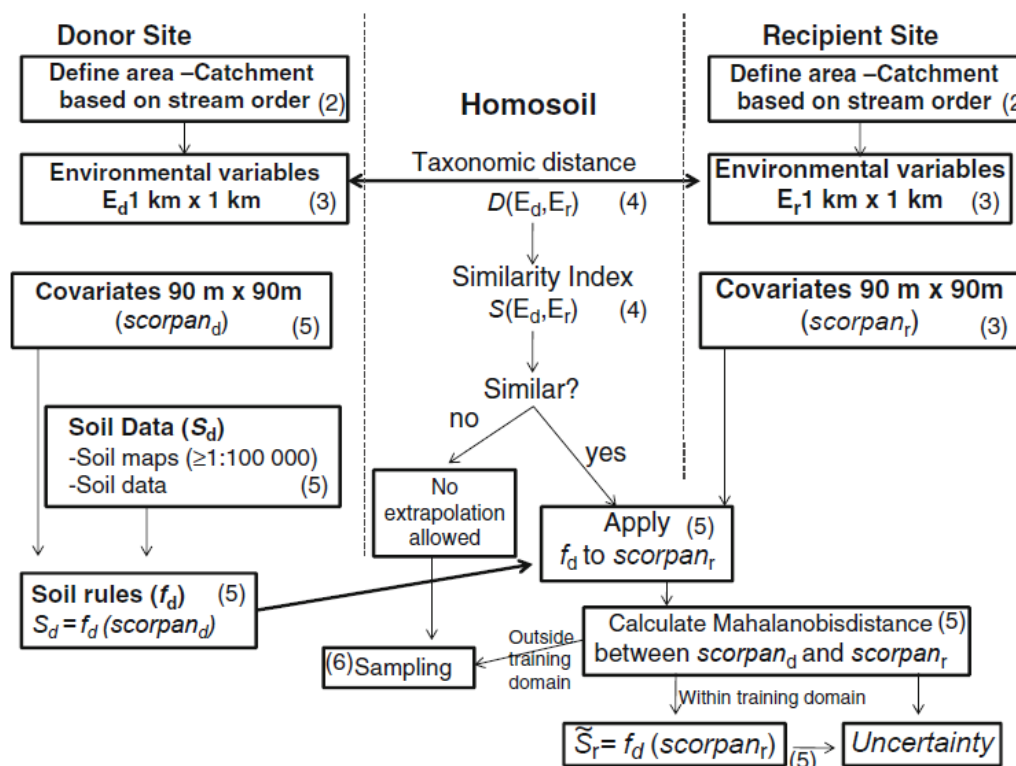
#### ۱- استفاده از مفهوم هوموسویلیز:

در بعضی از مناطق جهان نقشه خاک یا وجود ندارد و یا تهیه آن خیلی سخت می باشد، با توجه به محدود بودن زمان و بودجه و نیاز به ایجاد نقشه خاک برای این مناطق و ایجاد نقشه های جهانی، یک متدولوژی خاصی بر اساس مدل های مفهومی تشکیل و تکامل خاک تعریف شده باید ایجاد نمود تا نقشه خاک و تمام متغیرهای وابسته به خاک در آن منطقه به نحوی ترسیم گردد. برای رفع این مشکل در بعد جهانی متد هوموسویلیز توسط مالوان و همکاران (۲۰۱۰) پیشنهاد شده است. در این متد از داده های خاک و اطلاعات محیط منطقه ای شناخته شده برای تخمین داده ها و نقشه خاک مناطقی که فاقد آن ها می باشند استفاده شده است.

همچنان که در شکل دو مشخص است، انتقال اطلاعات خاک از منطقه نمونه به منطقه هدف با استفاده از متد هوموسویلیز قابل اجرا می باشد. در این متد مراحل زیر باید به اجرا در آید:

الف- شناخت و به نقشه در آوردن مناطقی که دارای اطلاعات و نقشه کاملی از خاک دارند و مناطقی که فاقد اطلاعاتی هستند.

ب- مشخص کردن محدوده حوضه های دهنده و گیرنده اطلاعات. شاخص شباهت های تمامی متغیرهای محیطی را پیکسل به پیکسل باید محاسبه و پیکسل های مشابه دو منطقه را شناسایی نمود. برای ایجاد رابطه خاک سرزمین باید پارسل های خاک مناطق دهنده و گیرنده یا مجموعه پیکسل های یکنواخت را در مقیاسی تعریف شده با استفاده از متد رده بندی آبراهه های استراهلر تا رده چهار یا پنج طبقه بندی کرده اقدام به محاسبه شاخص های شباهت فاکتورهای خاکسازی در پیکسل های مشابه.



شکل ۳- فرآیند اجرای متد هموسویل برای مناطقی که نقشه و اطلاعات خاک وجود ندارد از روی مناطقی که اطلاعات کاملی دارند.

ج- ایجاد پایگاه اطلاعات مکانی از متغیرهای محیطی برای یک محدوده بسیار بزرگ مثل قاره (ها) با اندازه پیکسل های ۱ کیلومتر که نماینده کاملی از فاکتورهای خاک سازی باشند. با محاسبه فاصله تاکسونومیک یا شاخص شباهت گور (Booth et al., 1987; Gower, 1971) گروه های متغیری (مثل خصوصیات اقلیمی، خصوصیات ژئولوژی، خصوصیات توپوگرافی و خصوصیات سنی) بین مناطق دهنده و گیرنده، مناطق مشابه تعیین می شوند. متعاقب آن شاخص ها را برای فاکتورهای خاک سازی باید محاسبه نمود. لذا از داخل مهمترین دسته که هموکلایم باشد شبیه ترین همولیت، هموکرون و هموتوپ را انتخاب می نمایم. می توان این فرآیند را با انتخاب شاخص شباهت به صورت سلسله مراتبی از مهمترین تا کم اهمیت ترین فاکتورها که مثلا در داخل همولیت ها هموکرون و در آن هموتوپ ها را به عنوان هموسویل انتخاب نمایم.

د- با داشتن پایگاه داده ای برای منطقه دهنده می توان آن ها را با استفاده از مدل های تخمین (درخت ریگراشن یا درخت تصمیم) به داده های اطلاعات محیطی منطقه گیرنده ترکیب و برای منطقه گیرنده نقشه تولید نمود. تفاوت تخمین بین مناطق نیز میزان خطای تخمین را معین می نماید.

### ۲- نمونه برداری خاک به روش لاتین هایپرکیوب شرطی:

نمونه برداری به هدف نقشه برداری خاک ها یکی از مهمترین قسمت مطالعات خاک شناسی می باشد. اگر نمونه های برداشت شده نماینده ای از تغییرات تمام فاکتورهای خاک سازی نباشند، نمی توانند نقشه مبتنی بر طبیعت ایجاد کرده خطای تخمین بالا می رود و خاک هایی که در طبیعت وجود دارند در نقشه تولیدی نادیده گرفته می شوند. نمونه برداری لاتین هایپرکیوب شرطی (LHS) توسط میناسنی و مک براتنی (۲۰۰۶) به عنوان یک طرح نمونه برداری برای نقشه برداری رقومی خاک پیشنهاد شد. نمونه برداری لاتین هایپرکیوب شرطی یک طرح نمونه برداری مونت کارلویی محدود شده ای می باشد. در این روش، یک طرح تصادفی طبقه بندی شده ای به اجرا در می آید که ارتباط موثری بین نقاط نمونه برداری با متغیرهای محیطی را فراهم می کند. یک شبکه مربعی حاوی موقعیت های نمونه از یک طرف و فاکتورهای تشکیل دهنده خاک (اطلاعات محیطی) به گونه ای که یک مربع لاتین را تشکیل و در هر ردیف و هر ستون محل یک نمونه (بدون تکرار) تشخیص داده شود. در این صورت در هر جزء از تغییرات واقعی داده های محیطی یک نمونه برداشت می شود و تأثیر آن بر تشکیل و تکامل خاک ها نشان داده می شود.

<sup>15</sup> - Conditional Latin Hypercube Sampling



## چهاردهمین کنگره علوم خاک ایران - سخنرانی‌های کلیدی

### ۳- مدل‌های تخمین زننده خصوصیات و کلاس خاک‌ها:

سیستم‌ها یا مدل‌های ارتباط دهنده متغیرها یا کلاس‌های خاک به فاکتورها و فرآیندهای خاک سازی از انواع خیلی ساده تا خیلی پیچیده و مرکب تقسیم بندی می‌شوند. انواع ساده آن‌ها فقط با بکار بردن فرضیاتی ساده مقادیر یا کلاس‌های خاک را در نقاط نمونه برداری نشده میانبایی می‌نمایند. انواع پیچیده آن‌ها سعی در اجرائی کردن مدل‌های مفهومی که انرا به شکل روابط ریاضی ارائه نموده اند دارند. مدل‌های مزبور را به سه دسته زیر می‌توان تقسیم نمود:

۱- مدل‌های اولیه که فقط از مقادیر نمونه‌ها در میان یابی متغیرهای مربوط به پدیده‌های طبیعی استفاده می‌کنند. این مدل‌ها پایه تئوریک قوی نداشته و بدون محاسبه میزان خطای تخمین میانبایی می‌نمایند. این مدل‌ها قبل از اینکه مباحث نقشه برداری خاک‌ها پیش بیاید برای ایجاد مدل‌های رقومی ارتفاعی، تهیه نقشه شیب، میانبایی آلودگی‌های هوا و غیره استفاده می‌شده‌اند. از این قبیل مدل‌ها می‌توان "همسایگان نزدیک"<sup>۱۶</sup> "مثلث بندی"<sup>۱۷</sup> "همسایگان طبیعی"، "عکس فاصله وزن دار" و غیره را نام برد. این مدل‌ها فرضیات تئوریک کاملی نداشته امکان ارائه نقشه خطای تخمین را ندارند.

۲- مدل‌های زمین آماری بر اساس این فرض که مقادیر متغیرها در پهنه فضایی طبیعت بواسطه ساختار مکانی خاصی بر اساس فاصله آن‌ها از هم تغییر می‌نماید استوار بوده دارای دو سطح ساده و ترکیبی می‌باشند. این مدل‌ها بر اساس فرضیه و تئوری علمی استوار بوده قادر به تخمین میزان خطا در نقاط مورد تخمین می‌باشند. مدل‌های ساده خصوصیات کمی منفرد خاک‌ها را میانبایی می‌نمایند، ولی مدل‌های مرکب توانائی خوبی در میان یابی خصوصیات کمی و کیفی خاک‌ها در گستره طبیعت را دارد.

۳- مدل‌های طبقه بندی کننده کلاس خاک‌ها روش‌های جدیدی هستند که مدل‌های مفهومی تشکیل و تکامل خاک‌ها را به شکل ریاضی بیان و حل می‌کنند. حاصل این داده کاوی‌ها نقشه‌هایی است که توزیع مکانی خاک‌ها را در عرصه طبیعت نشان می‌دهند. جدول شماره ۱ تعدادی از مدل‌های معروف این دسته را نشان داده ارجاعاتی به استفاده کنندگان مدل‌ها در کشور را نیز معرفی می‌نماید.

جدول ۱- عناوین مدل‌های معرفی شده برای نقشه برداری کلاس خاک‌ها همراه با تعرف افراد استفاده کننده داخلی

Models	Used in Iran by
Pedotransfer Function	-
Multiple Linear Regression	Taghizadeh et al., 1391,
Expert Knowledge	-
Decision Tree	Taghizadeh et al., 1392, Taghizadeh et al., 2012, Pahlavan Rad et al., 1393
Regression Tree	Jaafari et al., 2014
CART	-
Taxonomic Distance	Taghizadeh et al., 1392b
Multinomial Logistic Regression	Jaafari et al., 2012, Moravej 1391, Pahlevan Rad, 2014
Random Forest	Pahlavan Rad et al., 2014,
Neural Network, and combined with fuzzy	Bagheri et al., 2015, Taghizadeh et al., 1392, Taghizadeh et al., 1391, Taghizadeh et al., 1392a,
Bayesian Maximum Entropy	Hamzhepour et al., 2013, Hamzhepour et al., accepted (1394)
Fuzzy Classification	-
SoLIM	Bagheri et al., 1391a,b
Machine Learning	Mehnatkesh 1391
Markov Chains	-
Simulation	-

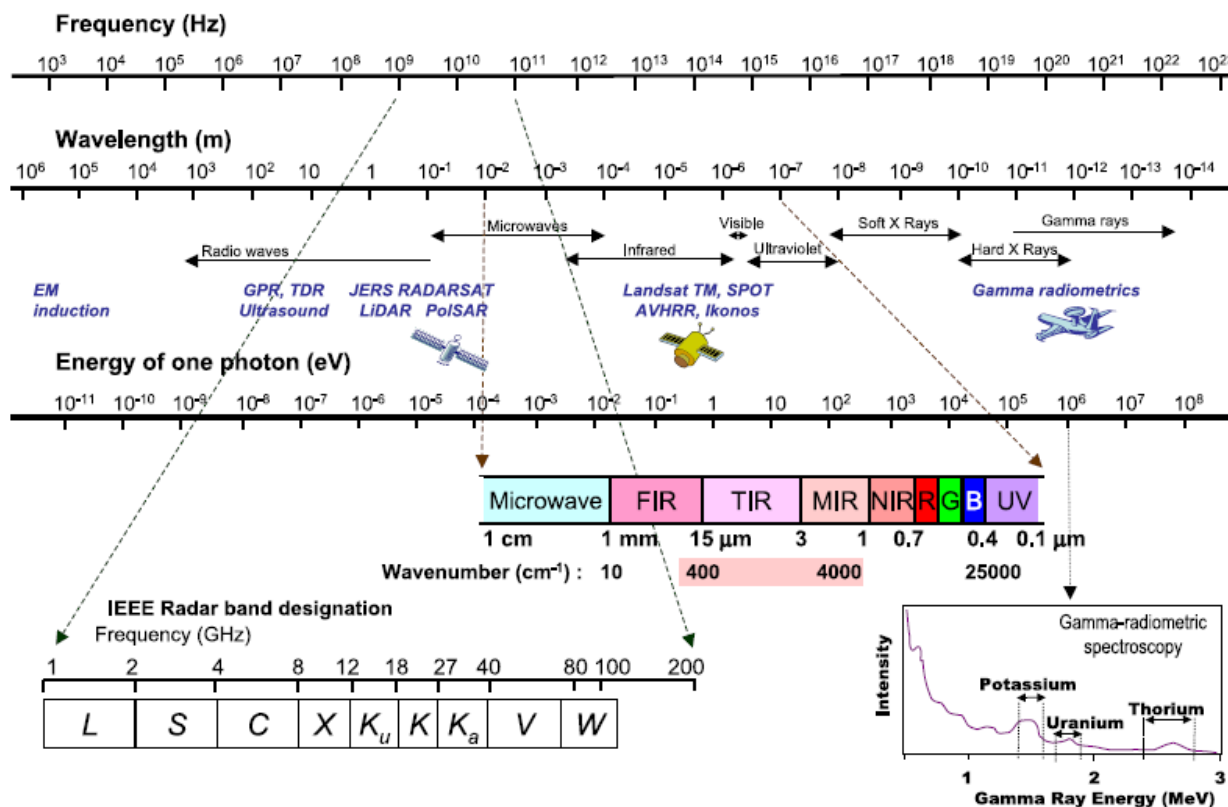
<sup>16</sup> - Nearest neighbor

<sup>17</sup> - Triangulated irregular network

Decision Support System	Mehnatkesh 1391
-------------------------	-----------------

۴- سنجش از دور و نزدیک خاک‌ها:

سالیان درازی است که از دورگویی در مطالعات محیطی استفاده‌های بسیاری می‌شود. در ارتباط با خاک سنجش از دور برای مطالعه پدیده‌هایی که به نحوی نمود سطحی داشته و یا در ارتباط با خصوصیات فیزیکی خاک که آثار خود را در تشعشعات برگشتی القا می‌نماید بیشتر انجام می‌شده است. ولی با توجه به پیشرفت‌های تکنیکی و سخت‌افزاری چندین سال اخیر امکان اندازه‌گیری‌های مستقیم و یا محاسبات غیر مستقیم از خصوصیات عمقی خاک نیز امکان پذیر شده که دامنه استفاده از سنجش از دور را هر چه بیشتر گسترش داده است. شکل شماره ۴ طیف وسیع طول موج‌هاییکه روش‌های مختلف سنجش از دور از آن‌ها استفاده می‌نمایند را نشان می‌دهد.



جدول شماره ۲- متغیرهایی از خاک که از مستقیماً با استفاده از سنجش از دور می‌توان اندازه‌گیری نمود.

Directly measures soil variables	As Auxiliary data	DEM extracting	Landform mapping
Mineralogy	Spectral bands	Topo-maps	Dent and Young, 1981, API
Soil Texture			
Soil Iron content			
Soil organic carbon			
Soil moisture	NDVI, SAVI, EVI indices	SPOT	Moore et al., 2003, by elevation, slope, aspect, curvatures, and flow accumulation
Soil salinity			
Carbonate content			
Land cover			



## چهاردهمین کنگره علوم خاک ایران - سخنرانی‌های کلیدی

Nitrogen content	Indicator of Plant Functional Types (PFT)	ASTER and ICONUS	Minar and Evans (2008), by Geometry
Lichen			
Photosynthetic vegetation			
Non-photosynthetic vegetation	Indicator of Ellenberg indicator (flora type)	Light Detection and Ranging (LIDAR) and SAR and stereo-correlation of images.	MacMillan et al. (2004)- LandMapR, by classifying a hierarchy of landform entities over a full range of spatial scales
Land degradation			

اخیراً روش سنجش از نزدیک که به روش‌های قبلی اضافه شده است در علم خاک شناسی کاربرد وسیعی یافته است. این تکنیک حتی مستقیم در مطالعات خاک شناسی ورود پیدا کرده و پارامترهای بسیاری را اندازه‌گیری و مراحل مختلف خاک شناسی را منتفع می‌نماید (جدول ۳).

جدول ۳- متغیرهایی از خاک که با روش سنجش از نزدیک برای سطوح مختلف خاک شناسی استفاده می‌گردند.

Method	Primary Soil Survey Application		
	Map Unit (Spatial) Data		Point Data
	Order 1 (high-intensity/special use soil survey)	Order 2 & 3	Point Data
	Map unit boundaries, component composition, and/or spatial distribution of properties	Map unit boundaries, component composition, and/or spatial distribution of properties	Soil property documentation (static or temporal properties)
Ground-Penetrating Radar	X	X	
Electromagnetic Induction	X	X	
Electrical Resistivity	X	X	
Magnetometry	X		
Magnetic Susceptibility	X		
Portable X-Ray Fluorescence			X
Time Domain Reflectometry			X
Optical Reflectance	X	X	X
Gamma Ray Spectroscopy	X	X	X
Mechanical Interactions	X		X
Ion-Selective Potentiometry	X		X
Seismic	X	X	

از جمله خصوصیات از خاک که از طریق سنجش از نزدیک مستقیم می‌توان اندازه‌گیری نمود عبارتند از: شوری، اجزاء بافت، انواع کانی‌های رسی، مواد آلی، عناصر غذایی، اسیدیته، استحکام ساختمان، مینرالوزی، ظرفیت تبادل کاتیونی و رطوبت خاک.

### ۵- مدل سازی سه بعدی خاک‌ها:

برای مدل سازی سه بعدی خاک‌ها دو روش کلی زیر وجود دارد:

- ۴- روش میان‌یابی لایه‌های مختلف و بعد ارتباط دادن لایه‌ها برای ارائه سه بعدی متغیرها (میان‌یابی سه بعدی).
- ۵- روش برازش دادن توابع عمق به تغییرات متغیرهای خاک و بعد میان‌یابی لایه‌های مختلف و ارائه سه بعدی متغیرها.



## چهاردهمین کنگره علوم خاک ایران - سخنرانی‌های کلیدی

این فرآیند در کنار افزایش قدرت و توان سخت افزاری، دانشمندان را برآن داشته است که برای مدیریت جامع قاره ای یا دنیایی خاک‌ها با هم متحد گردند. لذا در این مسیر پایگاه داده‌های ملی خاک‌ها را در یک پایگاه عظیم دنیایی جمع‌آوری، یکسان‌سازی و برای ایجاد نقشه‌های خاک دنیا متحد می‌نمایند.

### ج- پیشرفت در شناخت پیچیدگی‌های دنیای خاک با مفاهیمی جدیدتر:

#### پدودایورسیتی

آیا خاک در طبیعت از دیگر اجزاء و پدیده‌ها منفک است و به تنهایی تکامل می‌یابد.  
آیا مفهوم تکامل در خاک‌ها با تکامل دیگر موجودات زی‌حیات و یا فاقد حیات ارتباطی دارد.  
آیا مدل تکامل خاک‌ها از مدل داروینی پیروی می‌نماید؟

#### تئوری فراکتالز

آیا تغییرات پدیده‌ها در مقیاس‌های متمادی مشابه هستند.  
آیا ابعاد تغییرات پدیده‌های جهان در فضای چند بعدی می‌توانند اعشاری هم باشد؟  
تئوری فراکتالز برای توصیف بسیاری از شکل‌ها و الگوهای منتج از پویایی غیرخطی پیچیده پیشنهاد شده است.  
تئوری فراکتالز خود جزعی از تئوری آشوب می‌باشد.

#### تئوری آشوب

آیا تغییرات پدیده‌های خاکی غیر خطی و پیچیده هستند؟  
با وجود ورودی‌های یکسان (در بیشتر موارد) خروجی‌های متفاوت (خاک‌های متنوع) حاصل می‌شود.  
آیا تغییرات پدیده‌های خاکی ماهیتی پویا دارند؟  
در بازه زمانی معقول تکرار شدنی نیستند و الگوی مشخص ندارند  
آیا تغییرات پدیده‌ها به شرایط اولیه و به تغییرات در طول مسیر تکاملی (فرآیند تکامل) وابستگی دارند؟  
آیا فرایندهای خاک خود تنظیم هستند؟  
آیا فرایندهای طبیعت تکرار پذیر می‌باشند؟  
آیا این همه بی‌نظمی (به واسطه خود تنظیمی) به‌نظمی هم می‌رسند؟

### منابع

- Hengl, T., 2002. What is pedometrics. Pedometrics Society IUSS.
- Minasny, B., McBratney, A.B., Digital soil mapping: A brief history and some lessons, Geoderma (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.017>.
- McBratney, A.B., Mendonça Santos, M.L., Minasny, B., 2003. On digital soil mapping. Geoderma 117, 3-52.
- Grunwald, S., Thompson, J.A., Boettinger, J.L., 2011. Digital soil mapping and modeling at continental scales: finding solutions for global issues. Soil Sci. Soc. Am. J. 75, 1201-1213.
- B.P. Mallavan, B. Minasny, and A.B. McBratney (2010). Homosol, a Methodology for Quantitative Extrapolation of Soil Information Across the Globe. IN: J.L. Boettinger et al. (eds.), Digital Soil Mapping, Progress in Soil Science 2, DOI 10.1007/978-90-481-8863-5\_12, Springer Science+Business Media B.V. 2010.
- Booth, T.H., Nix, H.A., Hutchinson, M.F., and Busby, J.R., 1987. Grid matching: a new method for homocline analysis. Agricultural and Forest Meteorology 39:241-255.
- Gower, J.C., 1971. A general coefficient of similarity and some of its properties. Biometrics 27:857-871.
- Minasny, B., McBratney, A.B. 2006. A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. Computers & Geosciences 32(9):1378-1388.

## شاخص‌های نوین کیفیت فیزیکی خاک

محمد رضا مصدقی

دانشیار گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

### مقدمه

توان خاک برای انجام وظایف درون اکوسیستم و مرزهای کاربری زمین در جهت پایداری تولید بیولوژیک، تامین کیفیت زیست‌محیطی و سلامت گیاهان، جانوران و انسان را کیفیت خاک گویند (دوران و جونز، ۱۹۹۶؛ کارلن و همکاران، ۱۹۹۷). جنبه‌های کیفیت خاک شامل فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک است. کیفیت فیزیکی خاک<sup>۱۸</sup> (SPQ) بیانگر مقاومت خاک و ویژگی‌های انتقال و ذخیره ناحیه رشد ریشه می‌باشد که تحت تاثیر ویژگی‌های خاک، اقلیم، مدیریت، نوع گیاه و فرایندهای شیمیایی و بیولوژیک است. اگرچه جنبه‌های مختلف کیفیت خاک در ظاهر جداگانه تعریف شده‌اند ولی برهمکنش آنها بسیار مهم بوده و کیفیت فیزیکی بر کیفیت شیمیایی و بیولوژیک خاک نیز موثر است (ارشد و ماترین، ۲۰۰۲؛ دکستر، ۲۰۰۴).

اعتقاد کلی بر این است که یک خاک کشاورزی با کیفیت فیزیکی خوب دارای مقاومت کافی برای حفظ ساختمان خود و حمایت مکانیکی گیاه بوده و در عین حال به اندازه کافی سست است که امکان توسعه و رشد ریشه، و جانداران را فراهم می‌کند. همچنین خاک با کیفیت فیزیکی خوب توان ذخیره و انتقال آب، هوا و عناصر غذایی را برای رشد بهینه گیاه و تخریب کمینه محیط زیست دارد (تاپ و همکاران، ۱۹۹۷). اگرچه کیفیت فیزیکی خاک برای تمامی ناحیه رشد ریشه گیاه اهمیت دارد (حدود ۱ متر) ولی ۱۰ سانتیمتر رومی خاک اهمیت ویژه‌ای در رابطه با فرایندهای زراعی و محیطی مانند جوانه‌زدن بذر و رشد اولیه، خاکدانه‌سازی، اثر خاکورزی، فرسایش، سله، تهویه، نفوذ و رواناب دارد (رینولدز و همکاران، ۲۰۰۷).

اهداف مهم بررسی کیفیت فیزیکی خاک شامل دو جنبه مهم: (۱) ارزیابی مقدار تخریب یا احیا اراضی و (۲) شناخت شیوه‌های مدیریت اراضی پایدار است (دکستر، ۲۰۰۴). برخی از نشانه‌های کیفیت فیزیکی ضعیف خاک، نفوذایی ضعیف، ایجاد رواناب، سخت‌شوندگی<sup>۱۹</sup>، تهویه ضعیف، رسوخ ضعیف ریشه<sup>۲۰</sup>، و گاوروشدن ضعیف<sup>۲۱</sup> است که تمامی آنها نمودهای ساختمان ضعیف خاک<sup>۲۲</sup> است. آب، اکسیژن، دما و مقاومت مکانیکی، ویژگی‌های فیزیکی خاک هستند که به طور مستقیم رشد گیاه را تحت تاثیر قرار می‌دهند (لتی، ۱۹۸۵؛ کرخام، ۲۰۰۵). بنابراین منطقی به نظر می‌رسد که شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک در ارتباط مستقیم یا غیرمستقیم با این چهار ویژگی مهم تعریف شوند. شاخص‌های کیفیت خاک بیانگر جنبه‌های قابل اندازه‌گیری هستند که توان خاک در رابطه با تولید محصول یا دیگر وظایف زیست‌محیطی را تحت تاثیر قرار می‌دهند. شاخص‌هایی که بیشترین حساسیت را به مدیریت دارند، ارجحیت دارند. برای نمونه عمق خاک، ماده آلی، تنفس، ساختمان، بافت، چگالی ظاهری، نفوذ، فراهمی و ذخیره عناصر غذایی می‌توانند شاخص‌های خوبی برای کیفیت خاک باشند (ارشد و ماترین، ۲۰۰۲). اگر هدف ارزیابی جامع کیفیت (فیزیکی) خاک باشد، ضروری است شاخص‌های مختلف بررسی شده و یک شاخص جامع یا کلی با در نظر گرفتن اثر وزنی هر شاخص محاسبه

$$\text{شود} \left( SPQ_{\text{overall}} = \sum_{i=0}^n w_i \cdot SPQ_i \right).$$

یکی از مباحث مهم تعیین دامنه بهینه و حدود بحرانی شاخص‌های کیفیت خاک است. بر اساس تعریف، دامنه مطلوب یا بهینه، دامنه‌ای از مقادیر آن شاخص است که برای انجام مطلوب وظایف خاک در اکوسیستم و سلامت خاک ضروری است. حدود آستانه و بحرانی بیانگر مقادیر آن شاخص است که در مقادیر بزرگتر (حد بحرانی بالایی) یا کمتر (حد بحرانی پایینی) از آنها، وظایف خاک در اکوسیستم و سلامت خاک در حد مطلوب نیست. انتخاب حدود آستانه و بحرانی برای شاخص‌های کیفیت خاک با چالش‌ها و دشواری‌های زیادی روبروست که از آن جمله برهمکنش شاخص‌های کیفیت خاک بر یکدیگر، و اثر نوع گیاه، شرایط محیطی، اقلیم و .... بر این حدود است. یکی از راهکارها تعیین شرایط معیار<sup>۲۳</sup> (مثلاً خاکهای بکر یا دستنخورده) برای منطقه اکولوژیکی یا خاک مورد نظر است. سپس می‌توان دامنه مطلوب و حدود بحرانی را در مقایسه با آن شرایط معیار تعریف کرد (ارشد و ماترین، ۲۰۰۲).

### شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک

شاخص‌های متعددی برای کیفیت فیزیکی خاک پیشنهاد شده‌اند که در ادامه تعدادی از شاخص‌های مهم معرفی شده و دامنه مطلوب، حدود آستانه و بحرانی و محاسن و معایب آنها ذکر می‌شوند:

<sup>18</sup>Soil physical quality

<sup>19</sup>Hard-setting

<sup>20</sup>Poor rootability

<sup>21</sup>Poor workability

<sup>22</sup>Poor soil structure

<sup>23</sup>Benchmark

۱- چگالی ظاهری<sup>۲۴</sup> (BD): یکی از شاخص‌های رایج SPQ است که اندازه‌گیری آن آسان است. حد بحرانی بالایی BD برای خاک‌های رسی در دامنه  $6/1-5/1 \text{ g cm}^{-3}$ ، و برای خاک‌های لومی و شنی در دامنه  $8/1-6/1 \text{ g cm}^{-3}$  متغیر است (ویشمایر و هندریکسون، ۱۹۴۸). جونز (۱۹۸۳) حدود بحرانی پایینی و بالایی BD برای خاک‌های با درصد سیلت + رس بین ۹۰ تا ۱۰ درصد را به ترتیب در دامنه‌های  $6/1-2/1 \text{ g cm}^{-3}$ ، و  $8/1-4/1 \text{ g cm}^{-3}$  گزارش کرد. بر اساس نتایج پژوهشگران مختلف (جونز، ۱۹۸۳؛ اولنس و همکاران، ۱۹۹۸؛ رینولدز و همکاران، ۲۰۰۳)، می‌توان گفت در خاک‌های ریزبافت مقادیر BD کم‌تر از  $9/0 \text{ g cm}^{-3}$  منجر به تماس ضعیف ریشه-خاک و نگه‌داشت کم آب در خاک شده و حمایت فیزیکی از ریشه هم اندک است. مقادیر BD بزرگ‌تر از  $2/1 \text{ g cm}^{-3}$  منجر به محدودیت رشد ریشه و کاهش تهویه می‌شود، در مقادیر بیش از  $30/1-25/1 \text{ g cm}^{-3}$  محدودیت تهویه ایجاد شده و در مقادیر بیش از  $6/1 \text{ g cm}^{-3}$  محدودیت مکانیکی برای رشد ریشه ایجاد می‌کند (رینولدز و همکاران، ۲۰۰۸). ایراد وارده به این شاخص آن است که مستقیماً بر رشد گیاه موثر نیست و علاوه بر وابستگی به مدیریت، به ویژگی‌های ذاتی خاک نیز وابسته است؛ بنابراین ارائه مقادیر بهینه و بحرانی برای آن مستقل از نوع خاک دشوار است.

۲- چگالی ظاهری نسبی یا تراکم نسبی<sup>۲۵</sup> (RBD=RC): این شاخص یک نسبت بی بعد است که چگالی ظاهری را نسبت به چگالی ظاهری معیار یا مرجع ( $BD_{ref}$ ) همان خاک بیان می‌کند (  $RBD = \frac{BD}{BD_{ref}}$  ). برای اندازه‌گیری  $BD_{ref}$  می‌توان از آزمون پروکتور یا فشردگی محصور تحت تنش‌های محوری مختلف استفاده کرد. هکنسون (۱۹۹۰) گزارش کرد که چون  $BD_{200kPa}$  کوچک‌تر از  $BD_{Proctor}$  است، RBD محاسبه شده با  $BD_{Proctor}$  حدود ۷ الی ۱۷ درصد کوچک‌تر از RBD محاسبه شده با  $BD_{200kPa}$  است. حدود کلی بهینه RBD برای رشد گیاه (هکنسون، ۱۹۹۰؛ کارتر، ۱۹۹۰؛ داسیلوا و همکاران، ۱۹۹۴؛ هکنسون و لیبیس، ۲۰۰۰؛ ریچرت و همکاران، ۲۰۰۹) در دامنه  $9/0-7/0$  گزارش شده است. مقادیر RBD بهینه برای جو، گندم و چغندر قند برابر  $8/0$ ، برای نخود و یولاف برابر  $8/0$ ، برای لوبیا برابر  $8/0$  و برای سیب‌زمینی برابر  $8/0$  بدست آمده است (هکنسون و لیبیس، ۲۰۰۰). برای گیاه سویا (بیوتلر و همکاران، ۲۰۰۵)، RBD بهینه برابر  $8/0$  و برای گندم (کارتر، ۱۹۹۰) با  $BD_{ref}=BD_{Proctor}$  در دامنه  $8/0-7/0$  گزارش شده است. RBD بهینه برای رشد گندم و سویا (ریچرت و همکاران، ۲۰۰۹) با  $BD_{ref}=BD_{1600kPa}$ ، به ترتیب برابر  $8/0$  و  $9/0$  به دست آمده است. حسن RBD سادگی اندازه‌گیری آن و مستقل از نوع خاک، ارائه مقادیر بهینه و بحرانی آن برای رشد گیاه امکان‌پذیر است. ایراد RBD این است که مستقیماً بر رشد گیاه موثر نیست.

۳- تخلخل تهویه‌ای یا تخلخل پر از هوا<sup>۲۶</sup> (AFP=AC): این شاخص که بخش هوایی تخلخل خاک را بیان می‌کند، از تفاوت رطوبت اشباع ( $\theta_s$ ) و گنجایش مزرعه ( $F_C$ ) به دست می‌آید ( $AC = \theta_s - F_C$ ). حد بحرانی AC برای رشد ریشه در دامنه  $15/0-10/0$  قرار دارد (کوکرافت و اولسون، ۱۹۹۷). هم‌چنین در مفاهیم جدید آب قابل استفاده برای گیاه (LLWR و IWC)، این شاخص به عنوان معیاری برای حد بالایی آب قابل استفاده در نظر گرفته می‌شود. از محاسن این شاخص، ساده و رایج بودن آن و این که مستقیماً مرتبط با رشد گیاه است. ایراد AC این است که یک ویژگی حجمی (مقداری) است نه شدتی، و تهویه خاک علاوه بر حجم منافذ هوایی، به پیوستگی و اعوجاج آنها نیز بستگی دارد.

۴- هدایت هوایی<sup>۲۷</sup> ( $K_a$ ) و پخشیدگی هوایی خاک<sup>۲۸</sup> ( $D_a$ ): این دو ویژگی شاخص‌های خوبی برای توزیع اندازه منافذ، پیوستگی و اعوجاج منافذ خاک هستند. حد بحرانی  $K_a$  از دیدگاه شرایط تهویه‌ای خاک برای رشد ریشه برابر  $1 \text{ m}^2$  گزارش شده است (مولدراپ و همکاران، ۲۰۰۱). از محاسن این شاخص‌ها این است که مستقیماً مرتبط با رشد گیاه هستند و شاخص‌های پیوستگی و اعوجاج منافذ خاک با اندازه‌گیری آنها در رطوبتهای مختلف قابل محاسبه است. ایرادهای وارده به آنها شامل اندازه‌گیری دشوار، تغییرپذیری زیاد مکانی و زمانی، وابستگی زیادی به منافذ درشت و درز و ترک‌ها و دانسته‌های ناکافی درباره حدود بهینه و بحرانی آنها است.

۵- گنجایش مزرعه نسبی<sup>۲۹</sup> (RFC) و گنجایش هوایی نسبی<sup>۳۰</sup> (RAC): این دو شاخص بی بعد به ترتیب برابر نسبت  $F_C$  به  $\theta_s$  (  $RFC = \frac{\theta_{FC}}{\theta_s}$  )، و نسبت AC به  $\theta_s$  (  $RAC = \frac{AC}{\theta_s}$  ) هستند به گونه‌ای که همواره مجموع آنها برابر واحد است. چون این دو شاخص نسبی مرتبط با نگه‌داشت آب و تهویه خاک در رطوبت گنجایش مزرعه هستند، شرایط توازن بهینه بین نگه‌داشت آب و تهویه خاک (  $RFC=0.66$  یا  $RFC < 0.7 > 0.6$  و  $RAC=0.34$  یا  $RAC < 0.3 > 0.4$  ) را بیان می‌کنند (اولنس و همکاران، ۱۹۹۸). از محاسن این دو

<sup>24</sup>Bulk density

<sup>25</sup>Relative bulk density/Relative compaction

<sup>26</sup>Air-filled porosity/Air capacity

<sup>27</sup>Air permeability

<sup>28</sup>Air diffusivity

<sup>29</sup>Relative field capacity

<sup>30</sup>Relative air capacity



## چهاردهمین کنگره علوم خاک ایران - سخنرانی های کلیدی

شاخص سادگی و امکان ارائه مقادیر بهینه و بحرانی برای آنها مستقل از نوع خاک است. ایراد وارده این است که RAC و RFC و ویژگیهای حجمی هستند نه شدتی، و نگهداشت آب و تهویه خاک علاوه بر حجم نسبی منافذ، به توزیع اندازه منافذ و پیوستگی-عوجاج آنها نیز بستگی دارد.

**۶- آب قابل استفاده برای گیاه<sup>۳۱</sup> (PAWC):** آب قابل استفاده خاک برای گیاه (PAWC) که توسط ویشمایر و هندریکسون (۱۹۴۹) پیشنهاد شد، اولین مفهومی است که در رابطه با آب قابل استفاده خاک، در کشاورزی به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفت و تمامی آب خاک بین  $FC$  و نقطه پژمردگی دائم ( $PWP$ ) را برای گیاه فراهم می‌داند. دامنه بهینه آن توسط کوکرافت و اولسون (۱۹۹۷)  $cm^3 cm^{-3} 20/0 >$  و توسط کرال (۱۹۹۹)  $cm^3 cm^{-3} 25/0-15/0$  گزارش شده است. برای خاکهای میانه تا ریزبافت، هال و همکاران (۱۹۷۷)، گروه‌بندی زیر را برای PAWC از دیدگاه رشد ریشه ارائه کرده‌اند: بهینه ( $cm^3 cm^{-3} 20/0 >$ )، خوب ( $cm^3 cm^{-3} 20/0-15/0$ )، محدودیت ( $cm^3 cm^{-3} 15/0-10/0$ ) و ضعیف ( $cm^3 cm^{-3} 10/0 <$ ). حسن این شاخص ارتباط مستقیم آن با رشد گیاه است. ولی باید توجه داشت که مفهوم PAWC تنها بر اساس انرژی آب خاک ارائه شده و محدودیت‌های فیزیکی هم‌چون کمبود تهویه، مقاومت مکانیکی در برابر رسوخ ریشه در خاک و کاهش هدایت هیدرولیکی خاک با خشک شدن که بر فراهمی آب خاک برای گیاه مؤثرند، را در نظر نمی‌گیرد (لتی، ۱۹۸۵؛ کرخام، ۲۰۰۵). هم‌چنین در برخی شرایط، به دلیل نرخ یکسان تغییر  $FC$  و  $PWP$ ، پاسخ خاک به تغییر مدیریت را نشان نمی‌دهد.

**۷- تخلخل درشت<sup>۳۲</sup> (Macro-P) و تخلخل بیکره یا تخلخل ریز<sup>۳۳</sup> (Micro-P):** این دو شاخص به ترتیب سهم منافذ درشت و ریز در تخلخل کل خاک را بیان می‌کنند ( $Macro-P = s - 1kPa$  و  $Micro-P = 1kPa$ ). مقادیر Macro-P بزرگ‌تر از  $cm^3 cm^{-3} 07/0$  بیان‌گر شرایط بهینه و حد بحرانی پایینی آن برابر  $cm^3 cm^{-3} 04/0$  است (رینولدز و همکاران، ۲۰۰۹). در خاکهای میانه تا ریزبافت، از Macro-P برای ارزیابی تخریب ساختمان خاک (تخریب‌نشده،  $cm^3 cm^{-3} 10/0-05/0$ ؛ و تخریب‌شده،  $cm^3 cm^{-3} 04/0 <$ ) استفاده می‌شود (کارتز، ۱۹۸۸؛ دروری و همکاران، ۲۰۰۱؛ دروری و پاتون، ۲۰۰۵). حسن این شاخص، سادگی و امکان ارائه مقادیر بهینه و بحرانی برای آن است. ولی این ویژگی نیز حجمی است نه شدتی، چرا که نگهداشت آب و تهویه خاک علاوه بر حجم نسبی منافذ، به توزیع اندازه منافذ و پیوستگی-عوجاج آنها نیز بستگی دارد.

**۸- کربن آلی<sup>۳۴</sup> (OC):** با وجودی که OC یک ویژگی شیمیایی خاک است ولی به دلیل نقش کلیدی آن در کیفیت فیزیکی، از آن به عنوان شاخص کیفیت فیزیکی خاک یاد می‌شود. دامنه بهینه آن برای رشد ریشه ۳-۵% (کرال، ۱۹۹۹)، حد بحرانی پایینی آن برابر ۳/۲% (گرینلند، ۱۹۸۱) و حد بحرانی بالایی آن برابر ۶% (سوجکا و آپچورچ، ۱۹۹۹) گزارش شده است. ولی تجزیه و تحلیل دکستر و همکاران (۲۰۰۸) نشان داد که حداکثر مقدار کربن آلی قابل کمپلکس شدن (COC) حدود یک دهم مقدار رس خاک است. بنابراین با افزایش رس، مقدار کربن آلی لازم (COC) برای تامین کیفیت مطلوب خاک افزایش می‌یابد. حسن این شاخص سادگی و رایج بودن آن بوده و این که بر بسیاری از ویژگیهای فیزیکی خاک مؤثر است. ایراد وارده به آن این است که مستقیماً با منافذ خاک و رشد گیاه مرتبط نیست.

**۹- شاخصهای توزیع اندازه خاکدانهها<sup>۳۵</sup> (MWD، GMD، WSA و...):** شاخص‌هایی مانند میانگین وزنی قطر (MWD) و میانگین هندسی قطر (GMD) خاکدانهها، و درصد خاکدانههای پایدار در آب (WSA) در روشهای رایج الک تر و الک خشک برای ارزیابی پایداری ساختمان خاک در برابر تنشهای آبی و بادی محاسبه می‌شوند (کمپر و روزنا، ۱۹۸۶). حسن آنها سادگی و ارتباط با پایداری ساختمان خاک است. ولی این شاخص‌ها مستقیماً با منافذ و ساختمان خاک و رشد گیاه مرتبط نبوده و حدود بحرانی و بهینه برای آنها ارائه نشده است.

**۱۰- شاخص پایداری ساختمان خاک<sup>۳۶</sup> (SI):** این شاخص نسبت ماده آلی به مجموع سیلت+رس در خاک را بیان می‌کند (

$$SI = \frac{1.724 OC}{Silt + Clay} \times 100$$

تقسیمبندی پایداری ساختمان خاک بر اساس SI (پیری، ۱۹۹۲) بدین صورت است که مقادیر

SI بزرگ‌تر از ۹% بیان‌گر ساختمان پایدار، مقادیر ۷-۹% بیان‌گر خطر کم تخریب ساختمان، مقادیر ۵-۷% بیان‌گر خطر زیاد تخریب ساختمان و مقادیر کوچک‌تر از ۵% بیان‌گر تخریب ساختمان خاک است. حسن این شاخص، سادگی و ارتباط آن با پایداری ساختمان خاک است ولی این شاخص محاسبه‌ای است و پایداری ساختمان خاک مستقیماً اندازه‌گیری نمی‌شود. ایراد این شاخص آن است که مستقیماً با منافذ و ساختمان خاک و رشد گیاه مرتبط نیست.

<sup>31</sup>Plant-available water capacity

<sup>32</sup>Macroporosity

<sup>33</sup>Matrix porosity/Microporosity

<sup>34</sup>Organic carbon

<sup>35</sup>Aggregate size distribution indices

<sup>36</sup>Soil structural "stability index"

**۱۱- هدایت هیدرولیکی اشباع<sup>۳۷</sup> (K<sub>s</sub>):** این شاخص بیان‌گر بیشینه توان خاک برای هدایت آب از درون خود است. مقادیر بهینه آن برای نفوذ سریع، توزیع مجدد آب در خاک، کاهش رواناب و فرسایش خاک و زهکشی سریع آب اضافی (تهویه مناسب) خاک برابر ۵×۱۰<sup>-۴</sup> تا ۵×۱۰<sup>-۳</sup> cm s<sup>-۱</sup>، حد پایینی بحرانی آن برای خاکهای کشاورزی ریزبافت برابر ۱×۱۰<sup>-۴</sup> cm s<sup>-۱</sup> (دویت و مک کوئین، ۱۹۹۲؛ مک کوئین و شفر، ۲۰۰۲)، و حد بالایی بحرانی آن برابر ۱×۱۰<sup>-۲</sup> cm s<sup>-۱</sup> (رینولدز و همکاران، ۲۰۰۸) است. حسن این شاخص سادگی و رایج بودن آن است. ولی تغییرپذیری زیاد مکانی و زمانی، وابستگی زیادی به منافذ درشت و درز و ترک‌ها (که نقشی در نگهداشت آب و هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک ندارند)، از ایرادهای این شاخص است.

**۱۲- شاخص کیفیت فیزیکی خاک پیشنهادی دکستر<sup>۳۸</sup> (S):** شاخص S بیان‌گر شیب در نقطه عطف منحنی مشخصه رطوبتی خاک است. شاخص S وابسته به ریزساختار خاک<sup>۳۹</sup> بوده و بنابراین از بسیاری از ویژگیهای فیزیکی خاک تأثیر می‌پذیرد. تقسیم‌بندی کیفیت فیزیکی خاک بر اساس شاخص S بدین صورت است: S < 0.050 (خیلی خوب)، 0.035 < S < 0.020 (خوب)، 0.020 < S < 0.010 (ضعیف)، و S < 0.020 (خیلی ضعیف). شاخص S به بسیاری از ویژگیها و شرایط فیزیکی مهم خاک در رابطه با رشد گیاه ارتباط داده شده است (دکستر، ۲۰۰۴؛ a,b,c2004؛ دکستر و سز، ۲۰۰۷): بافت، ماده آلی، شوری-سدیمی بودن، رشد ریشه، تردی خاک و رطوبت مناسب برای خاکورزی، هدایت هیدرولیکی، تراکم خاک، سخت شدن خاک، مقاومت فروروی، و آب قابل استفاده برای گیاه. از محاسن این شاخص آن است که بیانگر توزیع اندازه منافذ و ریزساختار خاک بوده و مستقل از نوع خاک، ارائه مقادیر بهینه و بحرانی برای آن امکانپذیر است. از جمله ایرادهای این شاخص آن است که اندازه‌گیری منحنی مشخصه رطوبتی دشوار است، در خاکهای بدون ساختمان ذاتی (درشت-بافت) قابل کاربرد نیست و در خاکهای دو-تخلخلی باید مدل‌های دو-ناحیه‌ای برازش داده شده و دو شاخص بدست می‌آید که هنوز در مورد حدود بهینه و بحرانی آنها پژوهشی انجام نشده است.

**۱۳- تردی خاک<sup>۴۰</sup> (F):** تردی بیان‌گر تمایل توده محصورنشده خاک برای خرد شدن به قطعات کوچکتر با اندازه معین تحت تنش‌های کششی را گویند (اتومو و دکستر، ۱۹۸۱؛ واتس و دکستر، ۱۹۹۸؛ دکستر و واتس، ۲۰۰۱؛ مانکل، ۲۰۱۱). خرد شدن خاک ناشی از وجود منافذ و درز و ترکها (ریزساختار) در خاک است. سه روش برای اندازه‌گیری تردی خاک پیشنهاد شده است (دکستر و واتس، ۲۰۰۱): ۱- ضریب تغییرات<sup>۴۱</sup> مقاومت کششی خاکدانه‌های با اندازه مشخص (F<sub>1</sub>)، ۲- درجه بندی رتبه<sup>۴۲</sup> مقاومت کششی خاکدانه‌های با اندازه مشخص (F<sub>2</sub>)، و ۳- شیب رابطه مقاومت کششی در برابر حجم خاکدانه‌ها<sup>۴۳</sup> (F<sub>3</sub>). واتس و دکستر (۱۹۹۸) دریافتند که روابط زیر بین شاخص‌های تردی خاک برقرار است:  $F_1 = 2F_3 + \ln(F_1) = 0.929 \ln(F_3)$ . تردی خاک در رطوبت حدود 0.9PL به مقدار بیشینه خود میرسد (واتس و دکستر، ۱۹۹۸). گروه بندی زیر برای تردی (کیفیت فیزیکی) خاک بر اساس شاخص F<sub>3</sub> پیشنهاد شده است (اتومو و دکستر، ۱۹۸۱):  $F_3 < 0.05$  (غیرترد)،  $0.05 < F_3 < 0.10$  (کمی ترد)،  $0.10 < F_3 < 0.25$  (ترد)،  $F_3 > 0.25$  (خیلی ترد)، و  $F_3 > 0.40$  (ناپایدار). از محاسن شاخص تردی، وابستگی به توزیع اندازه منافذ و ریزساختار خاک، و ارائه مقادیر بهینه و بحرانی برای آن مستقل از نوع خاک است. ایرادهای این شاخص بدین شرح است: مستقیماً با رشد گیاه مرتبط نیست، اندازه‌گیری آن دشوار است، نظریه تردی در خاکهای با سلسله مراتب خاکدانه‌سازی کاربرد زیادی دارد ولی در برخی خاکها (عامل اصلی خاکدانه‌سازی غیر از ماده آلی) و در رطوبتهای زیاد اندازه‌گیری آن امکانپذیر نیست (واتس و دکستر، ۱۹۹۸).

**۱۴- مقاومت کششی و مقاومت فروروی<sup>۴۴</sup> خاک:** مقاومت کششی: حساسترین شاخص مقاومت مکانیکی به ریزساختار، توزیع اندازه منافذ و درز و ترک در خاک است (دکستر و کروسبرگن، ۱۹۸۵). مقاومت فروروی نیز بهترین شاخص مقاومت مکانیکی خاک در برابر رشد ریشه بوده و حد بحرانی آن برای رشد ریشه (۲ مگاپاسکال) مورد پذیرش عمومی است. مقاومت فروروی در مفاهیم جدید آب قابل استفاده برای گیاه (LLWR و IWC)، به عنوان معیاری برای حد پایینی آب قابل استفاده در نظر گرفته میشود (داسیلوا و همکاران، ۱۹۹۴). حسن مقاومت فروروی آن است که مستقیماً بر رشد گیاه موثر است. هر دو شاخص وابسته به توزیع اندازه منافذ و ریزساختار خاک بوده و مستقل از نوع خاک، ارائه مقادیر بهینه و بحرانی برای آنها امکانپذیر است. ایرادهای این دو شاخص بدین شرح است: تغییرپذیری زیادی داشته و تکرار زیادی برای ارائه نتایج قابل اعتماد ضروری است، مقاومت کششی مستقیماً با رشد گیاه مرتبط نیست و اندازه‌گیری آن تا حدودی دشوار است، و عوامل بسیاری (مانند چگالی ظاهری، رطوبت خاک) بر آنها موثرند.

<sup>37</sup>Saturated hydraulic conductivity

<sup>38</sup>Dexter's soil physical quality index

<sup>39</sup>Soil microstructure

<sup>40</sup>Soil friability

<sup>41</sup>Coefficient of variation method

<sup>42</sup>Ranking order method

<sup>43</sup>Volume-dependence method

<sup>44</sup>Tensile strength and penetration resistance

**۱۵ - رس قابل پراکنش در آب<sup>۴۵</sup> (WDC):** نشان‌دهنده بخشی از رس خاک است که بدون حذف مواد سیمانیکنده و بدون کاربرد (خودبخودی) یا با کاربرد انرژی مکانیکی (مکانیکی) در آب پراکنش مییابد (برویبکر و همکاران، ۱۹۹۲). حسن این شاخص، سادگی و ارتباط آن با پایداری ساختمان خاک است. ایرادهای آن بدین شرح است: مستقیماً با منافذ و ساختمان خاک و رشد گیاه مرتبط نیست، و شرایط استاندارد اندازه‌گیری و حدود بهینه و بحرانی برای آن ارائه نشده است.

**۱۶ - شاخصهای توزیع اندازه منافذ<sup>۴۶</sup>:** شاخصهای متعددی برای کمی کردن توزیع اندازه منافذ (موقعیت و شکل) بر اساس منحنی مشخصه رطوبتی خاک پیشنهاد شده است (رینولدز و همکاران، ۲۰۰۹): پارامترهای موقعیت شامل قطر میانه منافذ ( $d_{media}$ ), قطر مُد منافذ ( $d_{mode}$ ), و میانگین قطر منافذ ( $d_{mean}$ ), و شاخص‌های شکل شامل انحراف معیار هندسی (SD), چولگی (Skewness), و پخی (Kurtosis). حسن این شاخص‌ها آن است که بیانگر توزیع اندازه منافذ و ریزساختار خاک میباشند. ایرادهای وارده بدین شرح است: اندازه‌گیری منحنی مشخصه رطوبتی دشوار است، مستقل از نوع خاک، ارائه مقادیر بهینه و بحرانی برای آنها امکانپذیر نیست، و در خاکهای دو-تخلخلی باید مدل‌های دو-ناحیه‌ای برازش داده شده و دو گروه شاخص بدست میاید که هنوز در مورد آنها پژوهشی انجام نشده است.

**۱۷ - شاخصهای پایداری ساختمان خاک به روش منحنی مشخصه رطوبتی پراثری<sup>۴۷</sup> (HEMC):** یکی از روش‌های ارزیابی پایداری ساختمان (کیفیت فیزیکی) خاک، روش HEMC است که بر اساس منحنی مشخصه رطوبتی خاک در بخش پراثری (دامنه مرطوب) در دو حالت مرطوب‌شدن سریع و آهسته استوار است. در این روش حساسیت خاکدانه‌ها به پاشیدگی<sup>۴۸</sup> ناشی از هوای محبوس در منافذ خاک با استفاده از شاخص‌های مختلف از جمله نسبت پایداری<sup>۴۹</sup> (SR) سنجیده می‌شود. دامنه تغییرات SR بین صفر تا یک بوده و هر چه مقدار آن بزرگ‌تر باشد به معنای پایداری بیشتر ساختمان خاک است (پیرسون و مولا، ۱۹۸۹؛ لوی و ممدو، ۲۰۰۲). این روش محاسن زیادی دارد: بیانگر پایداری ساختمان و توزیع اندازه منافذ درشت تا متوسط خاک میباشند، شاخصهای متعدد پایداری ساختمان خاک محاسبه میشود، شاخص SR قابل مقایسه بین خاکها و تیمارهای مختلف است، و این روش قادر است تفاوت‌های اندک پایداری ساختمان خاک بین تیمارهای مختلف را نشان دهد. ایرادهای وارده به آن به شرح زیر است: مستقیماً با رشد گیاه مرتبط نیست، اندازه‌گیری و محاسبات مربوط به HEMC تا حدودی دشوار است ولی زمان کمی در مقایسه با روش رایج اندازه‌گیری منحنی مشخصه رطوبتی خاک صرف میشود، مقادیر بهینه و بحرانی SR ارائه نشده ولی با توجه به نسبی بودن ماهیت آن دشوار نیست.

**۱۸ - دامنه رطوبتی بدون محدودیت<sup>۵۰</sup> (LLWR) و گنجایش آب انتگرالی<sup>۵۱</sup> (IWC):** در دهه‌های اخیر با شناسایی عوامل مختلفی که بر جذب آب توسط گیاه مؤثرند، مفاهیم دامنه رطوبتی بدون محدودیت<sup>۵۲</sup> (NLWR) توسط لتی (۱۹۸۵)، LLWR توسط داسیلوا و همکاران (۱۹۹۴)، و IWC توسط گرونولت و همکاران (۲۰۰۱) پیشنهاد شده است. لتی (۱۹۸۵) NLWR را به عنوان دامنه‌ای از رطوبت خاک پیشنهاد کرد که در آن محدودیتی برای جذب آب از نظر پتانسیل آب کم، زیادی مقاومت مکانیکی و کمبود تهویه خاک برای گیاه ایجاد نمی‌شود. چون عوامل محیطی دیگری حتی در دامنه NLWR برای رشد گیاه محدودیت ایجاد می‌کنند، داسیلوا و همکاران (۱۹۹۴) این کمیت را به LLWR تغییر نام دادند. داسیلوا و کی (۲۰۰۴) معتقدند LLWR سه عامل مؤثر بر رشد گیاه را در یک کمیت خلاصه کرده و می‌تواند به عنوان شاخصی از کیفیت فیزیکی خاک استفاده شود. با کاهش کیفیت فیزیکی خاک، محدودیت‌های تهویه‌ای و (یا) مقاومت مکانیکی تشدید شده و LLWR کم‌تر از PAWC می‌شود؛ ولی گاهی اوقات تغییر نسبتاً یکسان  $w_{pwp}$  و  $f_c$  سبب می‌شود PAWC با تغییر درجه تراکم یا ماده آلی خاک تغییر چشم‌گیری نکند (عسگرزاده و همکاران، ۲۰۱۰). داسیلوا و کی (۱۹۹۷) دریافتند که رشد گیاه در خاک‌های با LLWR کم نسبت به خاک‌های با LLWR زیاد، بیش‌تر در معرض آسیب ناشی از شرایط خشکی (محدودیت مقاومت مکانیکی) یا بارندگی زیاد (محدودیت تهویه) قرار دارد. یکی از معایب NLWR و LLWR این است که مرزهای محدودکننده را ناگهانی در نظر گرفته و اثر توأمان محدودیت‌های فیزیکی را نیز در محاسبات به طور مدون لحاظ نمی‌کنند. در حالی که در طبیعت پاسخ گیاه به محدودیت‌های محیطی به صورت تدریجی تغییر می‌کند (بنگوق و همکاران، ۲۰۰۶). گرونولت و همکاران (۲۰۰۱) با پیشنهاد مفهوم کلی‌تر IWC تلاش کردند تا آب قابل استفاده را با در نظر گرفتن عوامل محدودکننده تدریجی مشابه پاسخ گیاه به محدودیت‌های محیطی محاسبه کنند. آنها دو محدودیت برای جذب آب در دامنه مرطوب شامل خروج سریع آب (در اثر ثقل) و تهویه ناکافی و دو محدودیت در دامنه خشک شامل هدایت هیدرولیکی کم و مقاومت مکانیکی زیاد خاک در نظر گرفتند. این روش دارای انعطاف‌پذیری خوبی در مقایسه با روش‌های پیشین بود ولی دانسته‌های ناکافی از شروع و کامل شدن محدودیت‌های مختلف برای گیاهان مختلف از دلایل استفاده کم‌تر از مفهوم IWC می‌باشد. در این روش می‌توان سایر عوامل محدودکننده جذب آب مانند شوری آب خاک را در نظر گرفت (گرونولت و همکاران، ۲۰۰۴). محاسن LLWR و IWC به

<sup>45</sup>Water dispersible clay

<sup>46</sup>Pore size distribution indicators

<sup>47</sup>High energy moisture characteristic

<sup>48</sup>Slaking

<sup>49</sup>Stability ratio

<sup>50</sup>Least limiting water range

<sup>51</sup>Integral water capacity

<sup>52</sup>Non-limiting water range

این شرح است: مستقیماً با رشد گیاه مرتبط هستند، و چون چندین ویژگی فیزیکی مرتبط با رشد گیاه در قالب یک کمیته محاسبه میشود، شاخصهای خوبی برای کیفیت فیزیکی خاک میباشند. ایرادهای وارده به این شرح است: اندازهگیری منحنیهای مشخصه رطوبتی و مقاومت مکانیکی دشوار است، مقادیر بهینه و بحرانی برای آنها تعریف نشدهاند (شاید بتوان از حدود بهینه و بحرانی PAWC برای این شاخصها نیز استفاده کرد که نیاز به پژوهش دارد)، مرزهای محدودکننده و ضرایب در مفاهیم LLWR و IWC بر اساس پژوهشهای متعدد، فرضیات منطقی و یا به صورت اختیاری انتخاب شدهاند؛ بنابراین اعتبارسنجی این حدود و ضرایب در شرایط گلخانه‌ای و مزرعه‌ای با حضور گیاه ضروری است.

**۱۹- انرژی انتگرالی ( $E_i$ ):** مفاهیم LLWR، PAWC و IWC، مقدار آب قابل استفاده خاک برای گیاه را محاسبه می‌کنند اما به مسیر منحنی مشخصه رطوبتی خاک که انرژی لازم برای جذب آب را تعیین می‌کند، توجهی ندارند. میناسنی و مک‌برانتی (۲۰۰۳) مفهوم  $E_i$  را معرفی کردند که می‌تواند در کنار مفاهیم آب قابل استفاده مورد استفاده قرار گیرد. بدین منظور مقدار انرژی مورد نیاز برای جذب واحد آب ( $E_i, J \text{ kg}^{-1}$ ) از یک دامنه رطوبتی (مثلاً PAWC) از راه انتگرال‌گیری منحنی مشخصه رطوبتی خاک محاسبه می‌شود. میناسنی و مک‌برانتی (۲۰۰۳) با بررسی ۱۵۲۰ خاک (استرالیا و جهان) دریافتند که با افزایش رس خاک  $E_i(\text{PAWC})$  افزایش می‌یابد. آنها با مقایسه دو خاک رس سیلنتی و رسی دریافتند که با وجود برابری PAWC در دو خاک، مقادیر  $E_i$  آنها متفاوت بود. عسگرزاده و همکاران (۲۰۱۱) دریافتند ارتباط بین  $E_i$  و مفاهیم نوین آب فراهم خاک مانند LLWR و IWC و هم چنین کیفیت فیزیکی خاک معنی‌دار بود. محاسن این شاخص بدین صورت است: محاسبه  $E_i$  نیازی به اندازه‌گیری‌های اضافه‌تر از آنچه برای PAWC، LLWR و IWC نیاز است (منحنی‌های مشخصه رطوبتی و مقاومت مکانیکی خاک) ندارد، محاسبه آسان و روابط قوی آن با ویژگی‌ها و شاخص‌های فیزیکی خاک (حساسیت آن به مدیریت و تغییر کیفیت فیزیکی خاک بیشتر از PAWC است) می‌تواند برای استفاده از آن در پژوهش‌های فیزیک خاک و آب و خاک و گیاه در آینده امیدوارکننده باشد (عسگرزاده و همکاران، ۲۰۱۱). ایرادهای این شاخص بدین شرح است: مستقیماً با رشد گیاه مرتبط نیست، اندازه‌گیری منحنیهای مشخصه رطوبتی و مقاومت مکانیکی دشوار است، و مقادیر بهینه و بحرانی برای آن تعریف نشده است.

**۲۰- شاخصهای آبگریزی و آبیذیری<sup>۵۳</sup>:** آبگریزی خاک بیان‌گر مقاومت خاک در برابر مرطوب شدن برای دوره‌های زمانی چند دقیقه‌ای، چند ساعته و یا بیشتر است. منابع ایجادکننده پوششهای آبگریز در خاک طبیعی شامل ترشح موسیلاژها و مواد آلی از ریشه گیاهان، اسیدهای آلی و پلیساکاریدهای حاصل از فعالیت‌های میکروبی، هیف‌های قارچی و موم‌ها، و مواد هیومیک آزادشده از بقایای گیاهی در حال تجزیه است. بر اساس زاویه تماس آب-خاک ( ) میتوان خاکها را از نظر آبگریزی به سه گروه تقسیم کرد: ۱) برابر صفر (آب‌دوست کامل)، ۲) کوچک‌تر از ۹۰ درجه (آب‌گریزی زیر-بحرانی<sup>۵۴</sup>)، و ۳) بزرگ‌تر از ۹۰ درجه (آب‌گریزی واقعی یا شدید). پیامدهای منفی آبگریزی شدید شامل کاهش نفوذپذیری آبی، تشدید روان‌آب و فرسایش خاک، ایجاد جریان ترجیحی و آشیوبی عناصر غذایی و آلاینده‌های شیمیایی، و کاهش رشد گیاه به اثبات رسیده است. ولی مقادیر مناسب مواد آب‌گریز سبب افزایش پایداری خاکدانه‌ها، افزایش (حفاظت فیزیکی) کربن آلی، افزایش پایداری فیزیکی (ساختمان) و کیفیت خاک و کاهش تبخیر آب از سطح خاک می‌شود (هالت، ۲۰۰۷؛ گوبل و همکاران، ۲۰۱۱). حضور مواد آب‌گریز مانند اسید هومیک با ایجاد پوشش دیواره منافذ از سوی دیگر سبب کاهش اثرات مخرب مرطوب شدن سریع بر ساختمان خاک می‌شود (پیکولو و باگوو، ۱۹۹۹؛ دی‌گریز و همکاران، ۲۰۰۶). بنابراین آبگریزی زیر-بحرانی می‌تواند شاخصی از کیفیت فیزیکی خاک محسوب شود (جردن و همکاران، ۲۰۱۳). اندازه‌گیری شاخص آب‌گریزی (RI) با روش جذبپذیری ذاتی و گروه‌بندی آن امکان‌پذیر است: غیرآب‌گریز (RI برابر ۱)، آب‌گریز زیر-بحرانی (RI بزرگ‌تر از ۱/۹۵)، و آب‌گریزی شدید (RI بیش از ۵۰) (تیلمن و همکاران، ۱۹۸۹؛ هالت و یانگ، ۱۹۹۹؛ لیبیس و همکاران، ۲۰۰۹). از محاسن این شاخص، اندازه‌گیری آسان و سریع و حساسیت زیاد آن به مدیریت و تغییر کیفیت فیزیکی خاک است، هم‌چنین این شاخص از ویژگیهای اساسی مرتبط با روابط آب و خاک است. ایرادهای وارده به آن بدین شرح است: مستقیماً با رشد گیاه مرتبط نیست، و علیرغم گروه‌بندیهای مختلف، مقادیر بهینه و بحرانی آن در رابطه با رشد گیاه تعریف نشده است.

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۱) در این مقاله، مروری بر برخی از شاخصهای مهم کیفیت فیزیکی خاک انجام شد. پیشنهاد می‌شود این شاخصها و عوامل مؤثر بر آنها در پژوهش‌های علوم خاک و آب کشور مورد توجه بیش‌تری قرار گیرند. تعیین حدود بهینه و بحرانی شاخصهای کیفیت فیزیکی خاک (به ویژه شاخصهای جدید) در ارتباط با رشد گیاه و تولید محصول ارزشمند است.

۲) با توجه به نقش کلیدی ماده آلی در ساختمان خاک، استفاده از سیستمهای مدیریتی که منجر به افزایش آن می‌شوند، سبب بهبود کیفیت فیزیکی خاک می‌گردند. از آنجایی که ساختمان نقش کلیدی در کیفیت فیزیکی خاک دارد، توجه به روشهای مدیریتی بهبود ساختمان خاک باید در اولویت بخش کشاورزی قرار گیرد. عمده خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران دارای رس‌های ۲:۱، ماده آلی کم و کربنات کلسیم زیاد می‌باشند که منجر به مقاومت مکانیکی زیاد در دامنه خشک می‌شود. پیشنهاد می‌شود پژوهش‌هایی برای مدیریت مقاومت مکانیکی زیاد خاک در دامنه خشک انجام گیرد.

<sup>53</sup>Water repellency and wettability indices

<sup>54</sup>Sub-critical water repellency



## چهاردهمین کنگره علوم خاک ایران - سخنرانی‌های کلیدی

۳) پیشنهاد میشود از شاخصهای کیفیت فیزیکی خاک برای گروه‌بندی زمین‌ها از نظر کیفیت فیزیکی خاک و ارزیابی زمین‌های کشاورزی برای تولید محصول استفاده شود. استخراج توابع انتقالی خاک برای تخمین شاخصهای دیرپافت کیفیت فیزیکی خاک در مقیاس کلان (منطقه‌ای و استانی) دانسته‌های ارزشمندی در اختیار کاربران، کشاورزان و ارگان‌های اجرایی (وزارت جهاد کشاورزی و سازمان‌های متولی حفظ و مدیریت خاک و آب در کشاورزی) قرار می‌دهد.

### منابع

- Arshad, M.A., and Martin, S., 2002. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. *Agric. Ecosys. Environ.* 88: 153-160.
- Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M.R., Mahboubi, A.A., Nosrati, A., and Dexter, A.R., 2010. Soil water availability for plants as quantified by conventional available water, least limiting water range and integral water capacity. *Plant Soil*. 335: 229-244.
- Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M.R., Mahboubi, A.A., Nosrati, A., and Dexter, A.R., 2011. Integral energy of conventional available water, least limiting water range and integral water capacity for better characterization of water availability and soil physical quality. *Geoderma*. 166: 34-42.
- Bengough, A.G., Bransby, M.F., Hans, J., McKenna, S.J., Roberts, T.J., and Valentine, T.A., 2006. Root responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell. *J. Exp. Bot.* 57: 437-447.
- Beutler, A.N., Centurion, J.F., Roque, C.G., and Ferraz, M.V., 2005. Optimal relative bulk density for soybean yield in Oxisols. *Braz. J. Soil Sci.* 29: 843-849.
- Brubaker, S.C., Holzhey, C.S., and Brasher, B.R., 1992. Estimating the water-dispersible clay content of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1226-1232.
- Carter, M.R., 1988. Temporal variability of soil macroporosity in a fine sandy loam under mouldboard ploughing and direct drilling. *Soil Till. Res.* 12: 37-51.
- Carter, M.R., 1990. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. *Can. J. Soil Sci.* 70: 425-433.
- Cockroft, B., and Olsson, K.A., 1997. Case study of soil quality in south-eastern Australia: management of structure for roots in duplex soils. In: Gregorich, E.G., and Carter, M.R. (Eds.), *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health*. Developments in Soil Science, vol. 25. Elsevier, NY, pp. 339-350.
- Craul, P.J., 1999. *Urban Soils: Applications and Practices*. Wiley, Toronto.
- da Silva, A.P., and Kay, B.D., 1997. Estimating least limiting water range of soils from properties and management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 877-883.
- da Silva, A.P., and Kay, B.D., 2004. Linking process capability analysis and least limiting water range for assessing soil physical quality. *Soil Till. Res.* 79: 167-174.
- da Silva, A.P., Kay, B.D., and Perfect, E., 1994. Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1775-1781.
- De Gryze, S., Jassogne, L., Bossuyt, H., Six, J., and Merckx, R., 2006. Water repellence and soil aggregate dynamics in a loamy grassland soil as affected by texture. *Eur. J. Soil Sci.* 57: 235-246.
- de Witt, N.M.M., and McQueen, D.J., 1992. Compactibility of materials for land rehabilitation. *DSIR Land Resources Scientific Report* 7.
- Dexter, A.R., 2004a. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*. 120: 201-214.
- Dexter, A.R., 2004b. Soil physical quality: Part II. Friability, tillage, tilth and hard-setting. *Geoderma*. 120: 215-225.
- Dexter, A.R., 2004c. Soil physical quality. Part III: unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. *Geoderma*. 120: 227-239.
- Dexter, A.R., and Czy, E.A., 2007. Application of S-theory in the study of soil physical degradation and its consequences. *Land Degrad. Dev.* 18: 369-381.
- Dexter, A.R., and Kroesbergen, B., 1985. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. *J. Agric. Eng. Res.* 31: 139-147.
- Dexter, A.R., Richard, G., Arrouays, D., Czy, E.A., Jolivet, C., and Duval, O., 2008. Complexed organic matter controls soil physical properties. *Geoderma*. 144: 620-627.
- Dexter, A.R., and Watts, C.W., 2001. Tensile strength and friability. In: Smith, K.A., Mullins, C.E. (Eds.), *Soil Analysis: Physical Methods*, 2nd ed. Marcel Dekker, New York, pp. 405-433.
- Doran, J.W., and Jones, A.J. (Eds.), 1996. *Methods for Assessing Soil Quality*. Special Publication No. 49. Soil Science Society of America, Madison, WI.
- Drewry, J.J., Cameron, K.C., and Buchan, G.D., 2001. Effect of simulated dairy cowtreading on soil physical properties and ryegrass pasture yield. *New Zealand J. Agric. Res.* 44: 181-190.
- Drewry, J.J., and Paton, R.J., 2005. Soil physical quality under cattle grazing of a winter-fed brassica crop. *Aust. J. Soil Res.* 43: 525-531.
- Goebel, M.O., Bachmann, J., Reichstein, M., Janssens, I.A., and Guggenberger, G., 2011. Soil water repellency and its implications for organic matter decomposition-is there a link to extreme climatic events? *Glob. Change Biol.* 17: 2640-2656.
- Greenland, D.J., 1981. Soil management and soil degradation. *J. Soil Sci.* 32: 301-322.



## چهاردهمین کنگره علوم خاک ایران - سخنرانی‌های کلیدی

- Groenevelt, P.H., Grant, C.D., and Murray, R.S., 2004. On water availability in saline soils. *Aust. J. Soil Res.* 42: 833-840.
- Groenevelt, P.H., Grant, C.D., and Semetsa, S., 2001. A new procedure to determine soil water availability. *Aust. J. Soil Res.* 39: 577-598.
- Hall, D.G.M., Reeve, M.J., Thomasson, A.J., and Wright, V.F., 1977. Water Retention, Porosity and Density of Field Soils. *Soil Survey Tech. Monog.*, vol. 9. Rothamsted, Harpenden, U.K.
- Hallett, P.D., 2007. An introduction to soil water repellency. In: *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Symposium on Adjuvants for Agrochemicals Vol. 6*, p. 9.
- Hallett, P.D., and Young, I.M., 1999. Changes to water repellence of soil aggregates caused by substrate-induced microbial activity. *Eur. J. Soil Sci.* 50: 35-40.
- H kansson, I., 1990. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil Till. Res.* 16: 105-120.
- H kansson, I., and Lipiec, J., 2000. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil Till. Res.* 53: 71-85.
- Jones, C.A., 1983. Effect of soil texture on critical bulk densities for root growth. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 1208-1211.
- Jordan, A., Zavala, L.M., Mataix-Solera, J., and Doerr, S.H., 2013. Soil water repellency: Origin, assessment and geomorphological consequences. *Catena.* 108: 1-5.
- Karlen, D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F., and Schuman, G.E., 1997. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 4-10.
- Kemper, W.D., and Rosenau, R.C., 1986. Aggregate stability and size distribution. pp. 425-442. In: Klute, A. (Ed.). *Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods.* ASA/SSSA. Madison, WI.
- Kirkham, M.B., 2005. *Principles of Soil and Plant Water Relations.* Elsevier, Amsterdam.
- Letey, J., 1985. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.* 1: 277-294.
- Levy, G.J., and Mamedov, A.I., 2002. High-energy-moisture-characteristic aggregate stability as a predictor for seal formation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1603-1609.
- Lipiec, J., Wojciga, A., and Horn, R., 2009. Hydraulic properties of soil aggregates as influenced by compaction. *Soil Till. Res.* 103: 170-177.
- McQueen, D.J., and Shepherd, T.G., 2002. Physical changes and compaction sensitivity of a fine-textured, poorly drained soil (Typic Endoaquept) under varying durations of cropping, Manawatu Region, New Zealand. *Soil Till. Res.* 63: 93-107.
- Minasny, B. and McBratney, A.B., 2003. Integral energy as a measure of soil-water availability. *Plant Soil.* 249: 253-262.
- Moldrup, P., Olesen, T., Komatsu, T., Schjonning, T., and Rolston, D.E., 2001. Tortuosity, diffusivity, and permeability in the soil liquid and gaseous phases. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 613-623.
- Munkholm, L.J., 2011. Soil friability: A review of the concept, assessment and effects of soil properties and management. *Geoderma.* 167-168: 236-246.
- Olness, A., Clapp, C.E., Liu, R., and Palazzo, A.J., 1998. Biosolids and their effects on soil properties. In: Wallace, A., and Terry, R.E. (Eds.), *Handbook of Soil Conditioners.* Marcel Dekker, New York, NY, pp. 141-165.
- Piccolo, A., and Mbagwu, J.S., 1999. Role of hydrophobic components of soil organic matter in soil aggregate stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1801-1810.
- Pieri, C.J.M.G., 1992. *Fertility of Soils: A Future for Farming in the West African Savannah.* Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Pierson, F.B., and Mulla, D.J., 1989. An improved method for measuring aggregate stability of a weakly aggregated loessial soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 1825-1831.
- Reichert, J.M., Suzuki, L.E.A.S., Reinert, D.J., Horn, R., and H kansson, I., 2009. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil Till. Res.* 102: 242-254.
- Reynolds, W.D., Yang, X.M., Drury, C.F., Zhang, T.Q., and Tan, C.S., 2003. Effects of selected conditioners and tillage on the physical quality of a clay loam soil. *Can. J. Soil Sci.* 83: 318-393.
- Reynolds, W.D., Drury, C.F., Yang, X.M., Fox, C.A., Tan, C.S., and Zhang, T.Q., 2007. Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. *Soil Till. Res.* 96: 316-330.
- Reynolds, W.D., Drury, C.F., Yang, X.M., and Tan, C.S., 2008. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. *Geoderma.* 146: 466-474.
- Reynolds, W.D., Drury, C.F., Tan, C.S., Fox, C.A., and Yang, X.M., 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma.* 152: 252-263.
- Sojka, R.E., Upchurch, D.R., 1999. Reservations regarding the soil quality concept. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1039-1054.
- Tillman R.W., Scotter, D.R., Wallis, M.G., and Clothier, B. E., 1989. Water repellency and its measurement by using intrinsic sorptivity. *Aust. J. Soil Res.* 27: 637-644.
- Topp, G.C., Reynolds, W.D., Cook, F.J., Kirby, J.M., and Carter, M.R., 1997. Physical attributes of soil quality. In: Gregorich, E.G., and Carter, M.R. (Eds.), *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health.* In: *Developments in Soil Science*, vol. 25. Elsevier, New York, NY, pp. 21-58.
- Utomo, W.H., and Dexter, A.R., 1981. Soil friability. *J. Soil Sci.* 3: 203-213.
- Veihmeyer, F.J., and Hendrickson, A.H., 1948. Soil density and root penetration. *Soil Sci.* 65: 487-494.
- Veihmeyer, F.J., and Hendrickson, A.H., 1949. Methods of measuring field capacity and wilting percentages of soils. *Soil Sci.* 68: 75-94.
- Watts, C.W., and Dexter, A.R., 1998. Soil friability: theory, measurement and the effects of management and organic matter. *Eur. J. Soil Sci.* 49: 73-84.



## بیوجار و کاربردهای زیست‌محیطی آن

محسن سلیمانی  
گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان

### چکیده

افزایش گازهای گلخانه‌ای در اثر فعالیتهای بشر منجر به تغییر اقلیم شده است که تهدیدی برای زندگی بشر محسوب می‌شود. یکی از راه‌های مقابله با پدیده تغییر اقلیم کاهش گازهای گلخانه‌ای است. تبدیل ضایعات کشاورزی و مواد آلی به بیوجار (زغال زیستی) به عنوان یک ماده جامد غنی از کربن با استفاده از فرایند پیرولیز تحت شرایط کمبود و یا نبود اکسیژن به عنوان روشی برای تثبیت کربن و جلوگیری از رهاسازی دی‌اکسید کربن به اتمسفر مطرح است. به‌طور کلی بیوجار دارای کاربردهای مختلف از جمله کاهش اثرات تغییر اقلیم، بهبود خصوصیات خاک، تولید انرژی و مدیریت مواد زاید است. استفاده از این ماده به عنوان یک ابزار مهم در پروژه‌های راهکار توسعه پاک (CDM) که در پروتوکل کیوتو مطرح شده نیز مورد توجه قرار گرفته است. ویژگی‌های بیوجار به نوع مواد اولیه و نوع فرایند تولید آن وابسته است. در این زمینه باید به مشکلات زیست‌محیطی آن مانند تولید مواد سمی و خطرناک مانند هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای طی فرایند تولید توجه شود.

واژه‌های کلیدی: بیوجار، تغییر اقلیم، آلودگی محیط زیست، سوخت زیستی، پیرولیز

### مقدمه

تغییر اقلیم یکی از بزرگترین تهدیدهای زندگی بشر محسوب می‌شود. افزایش گازهای گلخانه‌ای مانند دی‌اکسید کربن در اثر فعالیتهای انسانی مانند فعالیتهای صنعتی و کشاورزی و سوزاندن سوختهای فسیلی مهمترین عوامل این پدیده محسوب می‌شوند. بنابراین کاهش غلظت گازهای اتمسفر بدیهی‌ترین راه برای کاهش اثرات تغییر اقلیم خواهد بود (Lehman, 2007a). تلاشهای جامعه بین‌الملل برای کاهش اثرات تغییر اقلیم به شرح زیر بوده است:

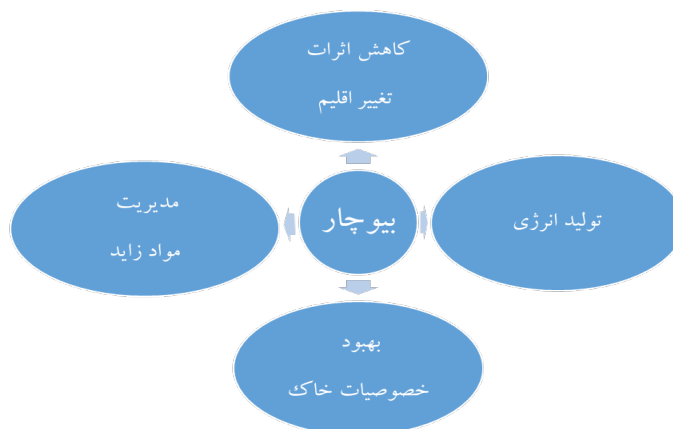
- ۶- هشدار دانشمندان در اوایل دهه شصت میلادی مبنی بر تغییر اقلیم در اثر افزایش گازهای گلخانه‌ای حاصل از فعالیتهای بشر
- ۷- تنها کنفرانس برگزار شده توسط سازمان ملل در سال ۱۹۷۲ در استکهلم سوئد با عنوان United Nations Conference on Human and Environment
- ۴- ایجاد برنامه زیست‌محیطی سازمان ملل (UNEP)
- ۵- تاسیس IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) در سال ۱۹۸۸ توسط UNEP و سازمان هواشناسی جهانی (WMO)
- ۶- ارائه گزارش IPCC در سال ۱۹۹۰ مبنی بر تاثیر گازهای گلخانه‌ای بر گرم شدن زمین در قرن ۲۱
- ۷- نشست زمین (Earth Summit) توسط سازمان ملل در ریودوژانیرو در سال ۱۹۹۲ و تشکیل UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change)
- ۸- تقسیم بندی کشورهای صنعتی در گروه Annex 1 و متعهد شدن آنها به کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای
- ۹- تشکیل COP (The Conference of Parties) توسط UNFCCC و سومین دوره آن در سال ۱۹۹۷ که منجر به امضای پیمان کیوتو (Kyoto Protocol) گردید.
- ۱۰- پیمان کیوتو کشورهای عضو را موظف به کاهش گازهای گلخانه‌ای به حداقل ۵/۲ درصد نسبت به سال ۱۹۹۰ می‌کرد و دوره آن ۵ ساله (از ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۲) بود.
- ۱۱- الزام اجرای پیمان کیوتو در سال ۲۰۰۵ با هدف جلوگیری از افزایش دما (حفظ حداکثر ۲ درجه سانتی‌گراد افزایش) تا پایان قرن ۲۱

با توجه وجود منابع عظیم مواد آلی در خاک‌های دنیا (حدود ۳۱۹۵ گیگاتن کربن) و نظر به این که مواد آلی در محیط زیست به ویژه در خاک در اثر تجزیه میکروبی و یا آتش‌سوزی منجر به تولید دی‌اکسید کربن می‌شوند، استفاده از روشی برای تثبیت آنها در خاک می‌تواند به کاهش انتشار گاز دی‌اکسید کربن به اتمسفر کمک کند. بیوجار یا زغال زیستی به عنوان یک راهکار برای تثبیت کربن در محیط مطرح شده‌اند. بیوجار یک ماده غنی از کربن است که در اثر تجزیه حرارتی مواد آلی در

محیط با اکسیژن کم و یا فقدان اکسیژن در دمای کمتر از ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد تولید می‌شود (Lehman and Joseph, 2009). به فرایند تولید آن پیرولیز اطلاق می‌شود. این فرایند منعکس کننده تولید زغال-سنگ می‌تواند باشد و اولین شواهد تولید بیوچار حاصل از آن در آمازون در سرزمین‌های سیاه معروف به ترا پرتا (Terra Preta) دیده شده است. پیرولیز آهسته چوب احتمالاً اولین واکنش شیمیایی بشر بوده است که توسط چینی‌ها استفاده شده است. مصری‌ها، یونانی‌ها و رومی‌ها با کربونیزاسیون چوب و تولید زغال از آن برای مومیایی کردن و پر کردن فواصل الوارها در ساخت کشتی استفاده می‌کردند. این واژه با توجه به کاربرد و نحوه تولید آن با آگریچار و هیدروچار نیز جایگزین شده است. ویژگی‌های بیوچار بسته به نوع ماده اولیه و شرایط پیرولیز متفاوت است. طی فرایند پیرولیز سوخت مایع و گاز نیز تولید می‌شود که به عنوان منبع انرژی قابل استفاده هستند (Lehman and Joseph, 2009). با افزایش دمای بیوچار راندمان تولید آن کاهش و در عوض تولید سوخته‌های مایع و گازی ممکن است افزایش یابد (Ippolito et al., 2012). با توجه به اهمیت این ماده کاربردهای مختلفی برای آن وجود دارد که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

### کاربردهای زیست محیطی بیوچار

به طور کلی کاربردهای زیست محیطی بیوچار در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- کاربردهای زیست محیطی عمده بیوچار

### کاهش گازهای گلخانه‌ای

بیوچار یک عامل مهم در ترسیب کربن در خاک است. لمن (2007a) گزارش کرده است که پیرولیز بقایای ۲۰۰ میلیون هکتار اراضی جنگل آمریکا (با فرض ۵/۳ تن بقایا در هکتار در سال)، پیرولیز پوشش‌های گیاهی سریع‌الرشد ۳۰ میلیون هکتار از اراضی این کشور (با فرض تولید ۲۰ تن بقایا در سال) و پیرولیز بقایای گیاهی ۱۲۰ میلیون هکتار از اراضی کشاورزی آمریکا (با فرض ۵/۵ تن بقایا در هکتار در سال) مجموعاً منجر به کاهش ۱۰ درصدی گازهای حاصل از سوخته‌های فسیلی این کشور که معادل ۶/۱ میلیارد تن کربن در سال ۲۰۰۵ بوده است می‌گردد. این موضوع اهمیت فرایند پیرولیز را به خوبی نشان می‌دهد. بیوچار علاوه بر کاهش رهاسازی دی‌اکسید کربن به اتمسفر منجر به کاهش رهاسازی سایر گازها مانند متان و اکسیدهای نیتروژن نیز می‌گردد که در الودگی هوا نقش دارند (Ippolito et al., 2012).

یکی از راهکارهای آرایه شده در پیمان کیتو در سال ۱۹۹۷ توجه به راهکار توسعه پاک (Clean Development Mechanism) یا CDM بوده است. این پروژه امکان معامله گازهای گلخانه‌ای آزاد شده به اتمسفر را بین کشورهای توسعه یافته و کشورهای در حال توسعه فراهم می‌کند. به این صورت که شرکتی که با اجرای یک طرح توسعه پاک در کشورهای در حال توسعه منجر به کاهش گازهای گلخانه‌ای به اتمسفر شود، به همان میزان مجوز رهاسازی گازهای گلخانه‌ای در کشور توسعه یافته بیشتر از استاندارد معین شده دریافت خواهد کرد و یا در قبال آن اعتبار مالی دریافت می‌کند (CEES, 2010). تولید بیوچار و سوخته‌های زیستی حاصل از آن به عنوان یکی از راهکارهای توسعه پاک در مقیاس کوچک مطرح هستند که در کشورهایی مانند هند با موفقیت اجرا شده‌اند (CEES, 2010).

### تاثیر بیوچار بر خاک و گیاه

پژوهش‌های زیادی در زمینه تاثیر بیوچار حاصل از مواد مختلف بر ویژگی‌های کیفی خاک و گیاهان انجام شده است که اغلب بر تاثیر مثبت و معنی دار بیوچار دلالت دارند (Ippolito et al., 2012). بیوچار علاوه بر بهبود خصوصیات فیزیکی خاک مانند افزایش قدرت نگهداری آب در خاک و نیز بهبود ساختمان خاک، به عنوان یک کود آلی منبع تغذیه کننده مناسبی برای رشد گیاهان محسوب می‌شود. البته باید توجه داشت یکی از محدودیت‌های بیوچار به ویژه بیوچارهای تولیدی در دمای بالا پهاش قلیایی آن است که می‌تواند منجر به کاهش حلالیت و جذب عناصر غذایی به ویژه ریزمغذیها گردد. بنابراین برای



## چهاردهمین کنگره علوم خاک ایران - سخنرانی‌های کلیدی

استفاده از بیوچار در خاکهای قلیایی باید به این نکته توجه داشت. البته استفاده از آن در خاکهای اسیدی می‌تواند باعث کاهش آبهویی عناصر و جلوگیری از آلودگی منابع آب گردد. در این زمینه نتایج پژوهش‌ها حاکی از کاهش آبهویی نیترات در خاکهای حاوی بیوچار بوده است (Ippolito et al., 2012).

### بیوچار به عنوان جاذب

استفاده از بیوچار به عنوان جاذب آلاینده‌های مختلف از جمله فلزات سنگین بررسی و نتایج موفقیت آمیزی را در پی داشته است (جزینی، ۱۳۹۳). علاوه بر آن بیوچار به عنوان جاذب فسفر، آنتی بیوتیک-ها و آلاینده‌های آلی دیگر نیز موثر بوده است (Ippolito et al., 2012). راهکارهای جذب الکترواستاتیکی، تبادل یون، جذب از طریق تبادل پروتون و یا پیوندهای لیگاندی ویژه در این زمینه مطرح شده است. دمای تولیدی بیوچار بر ویژگی‌های ساختاری بیوچار و در نتیجه جذب آلاینده‌های مختلف به وسیله آن تاثیرگذار بوده است.

### مدیریت مواد زاید توسط بیوچار و تولید انرژی

بیوچار می‌تواند به کاهش رهاسازی متان از لندفیل‌ها گردد. در صورت تبدیل ضایعات آلی به بیوچار علاوه بر کاهش انرژی مصرفی برای بازیابی ضایعات، امکان استفاده از انرژی تولیدی حین فرایند پیرولیز وجود دارد. منبع این انرژی گازهای تولیدی حین فرایند و نیز سوخته‌های مایع تولید هستند (Lehman and Joseph, 2009; Lehman, 2007b). همچنین در این زمینه انرژی لازم برای حمل و جابجایی ضایعات نیز کاهش خواهد یافت. تبدیل ضایعات به بیوچار با کاربری‌های مختلف می‌تواند به حفظ سلامت محیط زیست کمک کند. البته باید توجه داشت که امکان تولید مواد سمی و خطرناک مانند هیدروکربن‌های آروماتیک چنحلقه‌ای (PAHs)، پلی‌کلرین‌های بای فنیل (PCB)، دی‌اکسین و فوران‌ها و فلزات و شبه فلزات نیز حین فرایند پیرولیز مواد آلی و لجن‌های فاضلاب و صنعتی وجود دارد که باید به آن توجه جدی شود.

### جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

بیوچار به عنوان یک ماده حاصل از فرایند حرارتی در غیاب اکسیژن پتانسیل قابل توجهی در کاهش اثرات تغییر اقلیم دارد. این ماده در مدیریت منابع آب، خاک، مدیریت ضایعات و پسماندها و تولید انرژی حایز اهمیت است. تولید آن با توجه به نوع استفاده باید کنترل شده باشد. با توجه به پتانسیل کشور در زمینه تولید انرژی به ویژه انرژی پاک توجه جدی به پروژه‌های CDM مرتبط با بیوچار در کشور توصیه می‌گردد. همچنین توجه به مشکلات احتمالی تولید بیوچار با در نظر گرفتن مواد اولیه و شرایط تولید آن از مهمترین مسایل زیست محیطی مرتبط با اجرایی کردن پروژه‌های مختلف در ارتباط با این ماده است.

### منابع

- جزینی، ر. ۱۳۹۳. تبدیل ضایعات کشاورزی به بیوچار و کاربرد آن در جذب سرب و کادمیم از محلول‌های آبی. پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد محیط‌زیست، دانشکده‌ی منابع طبیعی دانشگاه صنعتی اصفهان.
- Lehman J. 2007a. A handful of carbon. *Nature*, 447: 143-144
- Lehmann J. 2007b. Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 5: 381-387.
- Lehmann J. and S. Joseph. 2009. *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*: Earthscan. London, UK.
- Ippolito J.A., D.A. Larid and W.J. Busscher. 2012. Environmental benefits of biochar. *Journal of Environmental Quality*. 41: 967-972.
- CEES, Center for energy and environmental security. 2010. Small-scale CDM concept document. University of Colorado at Boulder.

### Abstract

Increasing the greenhouse gases (GHG) due to anthropogenic source has been caused the climate change as a threat to human life. One of the identified solution to climate change is reducing the GHG. Conversion of agricultural wastes and organic materials to the biochar as a carbonaceous solid compound produced during lack or absence of oxygen (i.e pyrolysis process) is considered as an approach to reduce release of CO<sub>2</sub> to the atmosphere and consequently sequester carbon. By the way, biochar has various applications including mitigation of climate change effects, improvement of soil quality characteristics, production of biofuels and energy as well as waste management. Furthermore, it has been considered in the Clean Development Mechanism (CDM) which established in Kyoto Protocol. Biochar characteristics are depended on type of substrates and production procedures as well. However, production of toxic and hazardous compounds such as polycyclic aromatic hydrocarbons during the pyrolysis process could be mentioned as environmental problems of biochar.



چهاردهمین کنگره علوم خاک ایران - سخنرانی‌های کلیدی

## نام نویسندگان مقالات به ترتیب الفبا

**A**

۲۰.....A.I. Mamedov

**ح**

۶.....حسین شیرانی

**ر**

۱.....روح اله تقی زاده

**ع**

۲۹.....عبدالمحمد محنت کش

**م**

۱۷.....محسن سلیمانی

۹.....محمد رضا مصدقی

۱۲.....محمدحسن صالحی

**ن**

۱.....نورایر تومانیان