خاک و مدل‌سازی: یافتن سادگی در پیچیدگی

حبیب خداوردیلو
دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه. ۱۶۵-۵۷۱۳۵ ایران.
Email: h.khodaverdiloo@urmia.ac.ir

چکیده

مروری کوتاه از استانداردهای علمی و جایگاه فعلی آنها در بین جامعه علمی ارایه گردید. مدل‌سازی بر اساس تئوری‌های بیش از حد ساده شده و استفاده بی‌رویه از مدل‌ها بدون ورودی‌های دقیق و/یا سوءتفسیر آنها تقبیح گردید و کاربران به بازنگری تئوری‌ها و تلاش برای یافتن روش‌هایی به روز جهت تامین داده‌های ورودی دقیق‌تر توصیه شدند. مثال‌هایی خاص از فیزیک خاک ارایه گردید تا مدل‌سازی نادرست یا سوء تفسیر از پدیده‌های واقعی در اثر کاربرد تئوری‌های پایه‌ای نامناسب نشان داده شود. در پایان، تئوری تراوش به عنوان یک تئوری جایگزین برای تعیین بهتر این ویژگی‌های فیزیکی خاک معرفی گردید.

واژه های کلیدی: تئوری تراوش، توزیع اندازه منافذ، مدل، منحنی رطوبتی خاک.

علوم طبیعی، علوم خاک، و جامعه علمی

روز به روز بر پیچیدگی‌های جهان افزوده می‌شود و این پیچیدگی نه تنها در ابعاد سیاسی و فرهنگی که در علم و پژوهش و سیاست علم و پژوهش نیز رخ داده است. بر خلاف گذشته که انتظارات از منابع طبیعی (از جمله خاک) و از پژوهشگر و وظایف و خدمات آنها تصویر نسبتا روشنی داشت، امروزه نه وظایف منابع طبیعی و نه مسئولیت‌های جامعه علمی هیچ کدام به روشنی مشخص نیستند. در گذشته، اکثر دانشمندان با تصویری که اندیشمندان مختلف از جاعه علمی ارایه داده بودند (برای مثال مراجعه شود به: Philip، ۱۹۹۱ و منابع موجود در آن)، موافق بودند. در این دیدگاه، پژوهش به سمت گسترش دانش موثق جهت‌دهی می‌شد و دانش به عنوان برآوردهای تایید شده به لحاظ تجربی و منطبق با منطق قلمداد می‌گردید. این روند، یعنی تایید با مشاهدات و همخوانی با منطق، نه تنها کارآمد، بلکه راه صحیح و یک ضرورت فنی است. لذا منشور پژوهش مبتنی بر این دیدگاه بر چهار هنجار استوار است: عمومیت (universalism)، جامعیت (communality)، عدم دغدغه‌مندی (disinterestedness)، و شک و تردید سازمان یافته (organized skepticism).

لزوم عمومیت این است که نژاد، ملیت یا طبقه اجتماعی بر آزادی ورود به جامعه علمی یا قضاوت در مورد اعتبار کار پژوهشگر تاثیر نگذارد. جامعیت بدین معناست که دانش علمی باید در اختیار عموم قرار گیرد یعنی پنهان‌کاری یا محرمانه بودن بر خلاف این هنجار است و باید ارتباطات آزاد و کامل میسر باشد. لازمه عدم دغدغه‌مندی این است که ارزیابی دانشمند از حقیقت یک موضوع علمی آلوده به علاقه وی به شهرت، پاداش یا ارتقا اجتماعی نباشد. شک سازمان یافته یعنی پژوهشگر در نهایت نباید هیچ چیز را با یقین بپذیرد، نه کار پیشینیان و نه تئوری‌های موجود را. این چهار هنجار تا زمانی پایدارند که جامعه علمی استقلال کافی داشته باشد و نقض هر کدام از این هنجارها منجر به کاهش کارآیی و یکپارچگی کار علمی می‌شود. واقعیت کنونی تقریبا هیچ قرابتی با این هنجارها ندارد. می‌پذیریم که این منشور یک آرمان است که رسیدن به آن دشوار (و گاهی غیرواقع بینانه) است، اما به هر حال شدت عدول از این استانداردها، شدت انحراف علمی در یک جامعه را نشان می‌دهد (Philip، ۱۹۹۱ و منابع موجود در آن).

خاک به عنوان یک سیستم پیچیده سه فازی

واژه پیچیدگی (complexity) واژه‌ای بسیار مبهم است و در کاربردهای عمومی در بیان چیزی با اجزای متعدد و آرایشی شلوغ بکار می‌رود. معمولا، پیچیدگی با مفهوم "سیستم" گره خورده است. اصطلاح سیستم (سامانه) به گروهی از اجزای به هم پیوسته (interrelated) و وابسته به هم (interdependent) اطلاق می‌گردد که با هم یک جوهر یکپارچه (integrated entity) را می‌سازند. از آنجا که کل طبیعت در حقیقت یک جوهر یکپارچه است، در نظر گرفتن هر حوزه (domain) در طبیعت به عنوان یک "سیستم" تا حدّی فرضی است (Bartolo et al., 2011 و منابع موجود در آن). دراین صورت ما باید به یاد داشته باشیم که هر "سیستم" این چنینی که ما در نظر می‌گیریم، الزاماً یک زیرسیستم در درون سیستمی بزرگتر است. این زیرسیستم، مرزهایی رخنه‌پذیر دارد که از طریق آن، حوزه مورد نظر ما، پیوسته با پیرامون خود داد و ستد می‌کند. هر سیستم در تمامیت و جوهره یکپارچه خود ویژگی‌ها یا رفتارهایی از خود نشان می‌دهد که از روی ویژگی‌ها یا رفتارهای هر جزء آن قابل تشخیص نیست. ما می‌توانیم خاک را سیستمی پیچیده بپنداریم.

یک خاک واقعی محصول عمل آب و هوا و موجودات زنده بر روی مواد مادری در شرایط خاص پستی و بلندی در منطقه تشکیل خاک است. طول مدت زمانی که در طی آن این نیروها عمل می‌کنند در تعیین شخصیت محصول نهایی اهمیت زیادی دارد. شرایط زهکشی نیز مهم بوده و توسط شرایط خاص پستی و بلندی در منطقه، ماهیت مواد مادری و یا لایه‌های سنگی زیرین، و مقدار بارش و نرخ نفوذ و رواناب کنترل می‌گردد. بنابراین، پنج عامل اصلی تشکیل خاک شامل مواد مادری، آب و هوا، فعالیت بیولوژیکی، پستی و بلندی و زمان هستند. این عوامل تشکیل خاک به هم وابسته هستند، بطوریکه هر کدام از اینها اثرگذاری عوامل دیگر را تعدیل می‌نماید. با توجه به این فرایندهای مختلف مربوط به شکل‌گیری و پیدایش خاک، پویایی (دینامیک) خاک پیچیدگی بالایی از خود نشان می دهد. افزون بر این ، امروزه خاک از یک پیکره طبیعی به پیکره‌ای انسانی-طبیعی تغییر ماهیت داده است که این امر به پیچیدگی‌ها و پویایی آن می‌افزاید (Richter و Yaalon ، ۲۰۱۱). سیستم‌ها از نظر درجه پیچیدگی بسیار گوناگونند. خاک سیستمی ناهمگن، چندفازی، دارای ذرات ریز، پراکنده و متخلخل است.

امروزه میل به مدل‌سازی جنبه‌ها و فرآیندهای مختلف خاک بسیار گسترش یافته است (برای مثال مراجعه شود به: Vereecken و همکاران، ۲۰۱۶). گرچه این مدل‌ها برای کمک به درک بهتر پدیده‌ها و فرآیندها و کمک به طراحی و اجرا هستند، اما نگرانی‌هایی نیز وجود دارد که در زیر به برخی از آنها اشاره شده است.

مدل و مدل‌سازی: واقعیت‌ها و توهمات

امروزه حتی در محافل علمی از "استانداردهای علمی" که هیچ، از "علم" هم صدای رسایی شنیده نمی‌شود. هر چه می شنویم از "مدیر"، "مدیریت"، "تصمیم‌گیر" و سهامدار" و غیره است. این فرهنگ لغت جدید، واژگانی را رایج ساخته که ساده‌لوحی است اگر بپنداریم که محتوای علمی داشته باشند و من "مدل" و "مدل‌سازی" را از آن قماش می‌دانم (نقل قول از Philip، ۱۹۹۱). شاید بگوید نیوتن و انیشتین نیز مدل‌ساز بوده اند، اما آنچه آنها را از این تهمت دور می‌دارد این است که آنها به طور خارق‌العاده‌ای باهوش و بسیار فروتن بودند. اگر بپذیریم که هدف نهایی از مدل و مدل سازی یافتن حقیقت است آنگاه باید بگوییم که ما بیش از آنکه به اعتبارسنجی مدل‌ها نیاز داشته باشیم به آزمودن و اصلاح تئوری‌های (زیربنایی این مدل‌ها) نیازمندیم (نقل قول از Philip، ۱۹۹۱).

مدل، نمایشی گرافیکی، ریاضی (نمادین)، فیزیکی یا کلامی و یا نسخه‌ای ساده شده از یک مفهوم، پدیده، رابطه، ساختار، سیستم، و یا یک جنبه از جهان واقعی است. از آنجا که اکثر اشیاء و پدیده‌ها بسیار شلوغ (قطعات متعدد) و بیش از حد پیچیده (قطعات واجد ارتباطات متراکم) هستند لذا برای درک آنها در تمامیت خود، یک مدل تنها حاوی ویژگی‌های از آن اشیا و پدیده هاست که از نقطه نظر مدل‌ساز دارای اهمیت عمده و اساسی هستند. لذا یک مدل، دنیای واقعی نیست بلکه صرفا ساخته و پرداخته انسان است تا به ما در درک بهتر سیستم جهان واقعی کمک کند. به طور کلی همه مدل ها دارای یک ورودی اطلاعات، پردازنده اطلاعات، و یک خروجی حاوی نتایج مورد انتظار هستند.

ظهور مدل‌سازی با ظهور کامپیوترها مقارن گشت زیرا کامپیوترها محاسبه کمیت‌ها و پیچیدگی‌های ناممکن را ممکن ساختند و در علوم طبیعی نیز کامپیوتر دیدگان بشر را به جوانبی از منابع طبیعی (و خاک) که درک آنها به پردازش بسیار سنگین داده‌ها و یا محاسبات بسیار سنگین نیاز داشت، گشود. اما خیلی زود کاربران در دام و فریبایی کامپیوتر و مدل گرفتار شدند. مدل که می‌بایستی ما را در درک بهتر مشاهدات یاری کند، جای مشاهده را گرفت.

یکی از جنبه‌های ناخوشایند مدل‌سازی کامپیوتری، اختلاف بین مدل و رخدادهای جهان واقعی است، با گذشت زمان (و خو گرفتن کاربران با مدل‌ها و اعتماد به آنها) این شکاف کوچکتر نشد، ولی نگرانی در مورد آن رفته رفته رنگ باخت. کاربران، دیگر بیش از آنکه نگران طراحی درست مدل و صحت و اعتبار داده‌های خود و درجه انطباق فرضیات مدل با پدیده مورد مطالعه خود باشند، تنها به دنبال حداقل‌هایی هستند که بتوانند با آن مدل را اجرا نمایند. این اعتماد بی‌اساس نه تنها در پژوهش که در طراحی و اجرا و در تصمیم‌گیری نیز با شدتی بیشتر وجود دارد. لذا مدل‌سازی کامپیوتری عمدتا سبب رنگ باختن فعالیتهای آزمایشگاهی و مشاهدات میدانی در مطالعات و تصمیم و اجرا شد، بطوریکه تازه فازغ‌التحصیلان (و گاهی مدرسین آنها) با افتخار خود را خوره کامپیوتر و مدل معرفی می‌کنند در حالی که با پدیده‌های واقعی و مهارت‌های آزمایشگاهی و میدانی بیگانه هستند، بدون آنکه از این ناتوانی خود آگاه باشند.

Philip (۱۹۹۱) اظهار می‌دارد که دانشگاه‌ها رسالت آموزش موثر برای ایجاد یا توسعه یک حرفه و تربیت افراد حرفه‌ای را دارند، ولی عموما در گذشته این پیام به دانشجویان تلقین می‌شد که همه زوایای علم معلوم گشته و آنچه یک دانش آموخته یا مهندس جوان باید بداند این است که در کدام کتاب به دنبال مطلب موردنظر خود باشد و امروزه نیز نسخه‌ای جدید از همین پیام قدیمی داریم که همه چیز معلوم است و تنها باید بدانیم که در کدام نرم‌افزار یا مدل به دنبال خواسته خود باشیم. یک فرد حرفه‌ای می خواهد که با کمترین تلاش و صرف کمترین وقت به خواسته خود برسد و بر اساس آموزش‌های عمومی و دانشگاهی، کتاب و مدل او را به این هدف نزدیک‌تر می‌کنند. اما اگر کسی بخواهد این کار را به روش علمی انجام دهد بین علم و حرفه به دام می‌افتد و نمی‌تواند تکلیف خود را با ارزش‌ها و انگیزه‌های خود روشن سازد. گو اینکه راه حل مشخص و مدونی برای حذف این دوگانگی وجود ندارد، اما اگر علم و حرفه هر یک به ارزش‌های دیگری واقف بوده و خود را ملزم به رعایت آنها کند یک آشتی مسالمت‌آمیز بین این دو بوجود خواهد آمد.

فیزیک خاک چیست؟

واژه فیزیک برگرفته از واژه باستانی یونانی "physis" به معنای "طبیعت و ماهیت" است. ظاهراً، فیلسوفان آسیای صغیر نخستین کسانی بودند که در سده هفتم پیش از میلاد مسیح پرسش‌هایی درباره طبیعت و ماهیت یا فیزیک دنیای مادی مطرح کردند. گواینکه دلایل این فیلسوفان در توجیه باورهای علمی خویش با شیوه‌های استدلال علمی امروزی همخوانی نداشت، از تصورات خرافی مردم آن زمان کاملاً دور بود. اندیشه علمی این فیلسوفان، پس از آن در کشورهای تحت نفوذ یونان پی‌گیری شد. مباحث ایستاشناسی (static) و هیدروستاتیک ارشمیدس که مربوط به این دوران بود، رهیافتی بسیار نزدیک به علوم امروزی داشت. پس از ظهور اسلام، دانشمندان اسلامی از جمله ابوریحان بیرونی، ابن هیثم، خواجه نصیرالدین طوسی و دیگران، علم فیزیک را گسترش دادند که پژوهش‌های گالیله بر آنها استوار است. گالیله را می‌توان پایه‌گذار روش نوین در بررسی سیستم‌های ساده به کمک "اندازه‌گیری تجربی" و "تجزیه و تحلیل ریاضی" دانست. گالیله نشان داد که قوانین طبیعت از معادله‌های ریاضی معمولاً ساده‌ای پیروی می‌کنند. تلاش فیزیک‌دانان از آن زمان تاکنون، یافتن این روابط ریاضی برای تحلیل و بررسی اندازه‌گیری‌هایی است که در میدان مطالعاتی خود گرد می‌آورند.

فیزیک خاک، شاخه‌ای از فیزیک است که در مورد وضعیت و حرکت انرژی و ماده در محیطی متخلخل و بسیار تغییرپذیر به نام "خاک" بحث می‌کند. برای افزایش توانایی خاک در انجام وظایف خود، باید فاکتورها و فرآیندهایی که کیفیت خاک را در کشاورزی و سایر کاربری‌ها مثل جنگل، شهرنشینی، صنعت، نظامی و غیره تحت تاثیر قرار می‌دهند، بشناسیم. فیزیک خاک با معرفی پارامترهایی کمّی، فرآیندهای انتقال ماده (مثل آب، املاح، آلاینده‌ها، میکروب‌ها وغیره) و انرژی (مثل گرما) را در خاک بررسی می‌کند. در فیزیک خاک تلاش بر آن است تا مدل‌هایی ساده برای مطالعه این فرآیندها ارایه گردد، به گونه‌ای

که بتوان با استفاده از این مدل‌ها، فرآیندهای مورد نظر را در راستای هدف خود مدیریت نمود. هدف از ایجاد این مدل‌ها، یافتن روابط ساده حاکم بر فرایندهای پیچیده در محیط "ظاهراً بی‌نظم" خاک است. با مدیریت صحیح و زیرکانه این فرآیندها، افزون بر جلوگیری از تخریب خاک، می‌توان کارکردهای آن را نیز بهبود بخشید و یا جهتی مناسب به آن‌ها داد.

فیزیک خاک و مدل‌سازی

فیزیک خاک هویتی دوگانه دارد؛ هم شاخه‌ای از فیزیک و هم شاخه‌ای از علوم خاک است؛ اما مشروعیت آن به عنوان علم بستگی به ادعای او در مورد فیزیک بودن دارد؛ این بدان معناست که ساختاری قایم به ذات (نداشتن اجزا یا جنبه‌هایی که در تعارض و یا تضاد با یکدیگر باشند) از تعاریف و مفاهیم زیربنایی برای معادلاتی دارد که ما از آنها استفاده می‌کنیم. Hunt و همکاران (۲۰۱۳) پس از بررسی برخی مفاهیم پایه‌ای، به طور خاص مفاهیم ارتباط دهنده منحنی رطوبتی به توزیع اندازه ذرات، رابطه هدایت هیدرولیکی غیراشباع و مدل همرفت-انتشار، دریافتند که هر سه بر این مفهوم استوارند که خاک متشکل از دسته‌ای از لوله‌های مویین است. این مدل مفهومی پایه، نه قایم به ذات است (تهدیدی فراروی ادعای ما به عنوان یک علم قانونمند) و نه ارتباط محکمی با واقعیت دارد (تهدیدی فراروی توانایی ما در استدلال و برآورد موفق). آنها استدلال می‌کنند که بسیاری از تلاش‌های ما در دهه‌های گذشته، بر مدل مفهومی ناقص "خاک به عنوان دسته‌ای از لوله‌های مویین" بنا شده است. آنها به جای این مفهوم، مفهوم شبکه منفذی (pore network concept) را ارائه داده‌اند که می‌توان آن را با استفاده از ریاضیات تئوری تراوش (percolation theory) به کار گرفت. آنها نتیجه‌گیری کردند که ما باید یک مدل مفهومی مقبول و قایم به ذات در آموزش، تحقیق و کاربرد، بنا نهیم تا فیزیک خاک بتواند هم در حوزه خاک و هم در حوزه فیزیک ریشه بدواند و راه حلی برای چالش‌های فراوان در تولید غذا، هیدرولوژی، کیفیت آب، انرژی و تغییرات اقلیمی بیابد.

مفهوم نهان مویینگی

پیشرفت در فیزیک خاک از یک سوءبرداشت که اتفاقا مورد وفاق بسیاری از دانشمندان نیز می‌باشد، رنج می‌برد، و آن اینکه مدل‌های بسته‌های مویین (capillary bundle models) بیان مناسبی از ویژگی‌های نگهداشت آب، جریان و انتقال در محیط متخلخل دارند. بدیهی است که مدل بسته مویین ساده نمی‌تواند درست باشد، زیرا یک خاک واقعی می‌تواند جریان را در جهات مختلف هدایت کند. بر اساس این مدل، منافذ باید حداقل نفوذ در خاک در جهت متعامد را داشته باشند، به طوری که (در شدیدترین حالت) یک سوم از منافذ به هر راستا اختصاص می‌یابد. اما با اینکه پوچ بودن مفهوم بسته مویین به روشنی پیداست، ما همچنان به آموزش، تحلیل و اشتقاق بر اساس این پوچ ادامه می‌دهیم. البته هر مدل مفهومی، تلاشی برای ساده-سازی یک سیستم واقعی است، اما خطاهایی که توسط مدل‌های بسته‌های مویین بروز می‌یابند، فراگیر، گزندزا و در عین حال نامشخص است. به قول Dullien (۱۹۹۲) "خطر نهفته در چنین مدل‌هایی این است که آنها به دلیل سادگی، محبوبیت می-یابند و برخی افراد ممکن است باور کنند که آنها به واقعیت (در این جا ساختار واقعی منافذ) نزدیک هستند".

تعداد کمی از ما در ظاهر خاک را به صورت بسته‌های مویین می‌پنداریم، اما مفهوم بسته‌های مویین در باطن، اساس بسیاری از معادلات پایه‌ای ما را تشکیل می‌دهد. Hunt و همکاران (۲۰۱۳) می‌گویند اینکه "فیزیک خاک چیست؟" در واقع به روشی بستگی دارد که این رشته در اشتقاق روابط ریاضی حاکم خود برمی‌گزینند. در زیر به پیروی از Hunt و همکاران (۲۰۱۳) عدم تناسب مدل بسته‌های مویین در بیان برخی ویژگی‌های کلیدی فیزیک خاک آمده است.

منحنی رطوبتی در برابر توزیع اندازه منافذ خاک

منحنی رطوبتی خاک (WRC)، مفهومی کلیدی در فیزیک خاک است که به عنوان چکیده اطلاعات مربوط به ویژگی‌های فیزیکی خاک پنداشته می‌شود. این منحنی هم به خودی خود سودمند است و هم به عنوان روشی برای برآورد توزیع اندازه منافذ خاک (PSD) از طریق معادله مویینگی بکار می‌رود. از این PSD سپس می‌توان برای تخمین هدایت هیدرولیکی غیراشباع و سایر روابط مورد نظر استفاده کرد.

تفاوت بین محیط متخلخل واقعی و مدل بسته مویین بیش از ۵۰ سال پیش توسط Irwin Fatt (۱۹۵۶؛ مراجعه شود به Hunt و همکاران (۲۰۱۳)) ذکر شده است: "معادلات، به اندازه مدلی که برای ایجاد آنها بکار می‌رود، اعتبار دارند. دو مدلی که از دیرباز استفاده می‌شوند- یعنی آرایش کروی (sphere pack) و بسته‌ای از لوله‌ها- خیلی ساده هستند. گو اینکه می‌توان مشتقاتی دقیق از این مدل‌ها بدست آورد، اما این مدل در نمایش صحیح محیط متخلخل واقعی ناتوان است."
ایراد اصلی Fatt به مدل بسته مویین این بود که برخلاف محیط متخلخل واقعی، ارتباط متقاطع بین لوله‌ها در این مدل وجود ندارد؛ اما دسته لوله‌ها، ارتباطاتی نیز دارند که محیط متخلخل واقعی ندارد: هر لوله در "کل نمونه خاک" امتداد دارد. لذا با اینکه در مدل بسته مویین ارتباطی یکنواخت بین PSD و WRC وجود دارد، این ارتباط در خاک و دیگر محیط‌های متخلخل، فوق‌العاده پیچیده‌تر است.

درشت‌ترین منافذ، نادیده گرفته می‌شوند

WRC، معمولا با اشباع کردن یک نمونه خاک، قرار دادن آن روی سطحی که آب از آن عبور می‌کند ولی هوا نه، سپس اعمال فشار هوای بیشتر و بیشتر به این سطح، و اندازه‌گیری آب خروجی، تعیین می‌گردد. سه شرط باید برقرار باشد تا یک منفذ، زهکشی گردد: (۱) آن منفذ به اندازه کافی فراخ باشد که آب نتواند به واسطه نگهداشت توسط نیروهای موییننگی در برابر فشار اعمال شده، مقاومت کند، (۲) هوا باید بتواند وارد آن شود، و (۳) آب بتواند از آن خارج شود. شرط اول، منفذ را مجاز (allowable) می‌نماید و دو شرط دیگر آن را دسترس‌پذیر (accessible) می‌کنند.
یک بسته مویین، هیچ نوع محدودیت دسترس‌پذیری نخواهد داشت. اما در خاک واقعی، برخی منافذ فراخ که در فشار پایین مجاز هستند، ممکن است دسترس‌پذیر نباشند. این منافذ تا زمانی که هوا به آنها نرسد نمی‌توانند زهکشی شوند، آب زهکشی شده از آنها در این نقطه به منافذی با شعاع کوچکتر از آنها نسبت داده می‌شود. دسترس‌پذیری سبب طویل شدن بخش مسطح در WRC در فشارهای کم، که به منطقه افت شدید در مقدار رطوبت در حدود فشار ورود هوا منتهی می‌شود، می‌گردد. تندیِ این مرحله گذر برای نمونه‌های بزرگ‌تر خاک، بیشتر است و برای نمونه‌هایی با ساختار فشرده‌تر منافذ، کم‌تر است. اگر از مفهوم بریدن-و-دوباره پیوستن (cut-and-join concept)، که برای محاسبه هدایت هیدرولیکی غیراشباع $K(\theta)$ بکار می‌رود، برای تجزیه و تحلیل WRC نیز استفاده می‌شد، ما خیلی پیشتر متوجه این مسئله دسترس‌پذیری می‌شدیم؛ عدم کامیابی ما در مشاهده این موضوع تا حدی به استفاده ناجور از مدل‌ها برمی‌گردد.
چیزی که مسئله دسترس‌پذیری را پیچیده‌تر می‌کند، نقش ثقل است. در اندازه‌گیری WRC، در نمونه درازتر، انتقال ناگهانی‌تری در فشار ورود هوا نسبت به نمونه کوتاه‌تر رخ می‌دهد. این بدان دلیل است که اشباع در طول نمونه سرشکن می‌شود که تحت یک شیب ثقلی است؛ محاسبه عواقب این امر وقتی می‌خواهیم از PSD به WRC برسیم، ساده است، اما اگر بخواهیم از WRC به PSD برسیم، بسیار پیچیده‌تر است. اگر سایر عوامل یکسان باشند، انتظار می‌رود که تابع نرم‌تر ون‌گنوختن برازش بهتری به نمونه‌های درازتر و مدل قاطع‌تر بروکس و کوری برازش بهتری به نمونه‌های کوتاه‌تر داشته باشد. اما، انتخاب بین مدل‌ها باید بیشتر بر اساس ویژگی‌های خاک باشد نه متاثر از ارتفاع نمونه خاک مورد اندازه‌گیری.
نتیجه نهایی اینکه بر خلاف درکی که از مدل بسته مویین حاصل می‌شود، در PSD برآورد شده از WRC برخی منافذ فراخ نادیده گرفته می‌شوند که مقدار آن به اندازه نیروی ثقل و ساختمان خاک بستگی دارد. مدتهاست که از این اثرات آگاهیم، اما در فیزیک خاک کمتر به آنها اهمیت داده شده است و کمتر به فکر اصلاح آنها بوده‌ایم.

کوچکترین منافذ، غیرواقعی هستند

وقتی خاک زهکشی می‌شود، هدایت هیدرولیکی آن به شدت کم می‌شود. مدل بسته مویین این مسئله را این‌گونه تفسیر می‌کند که وقتی هوا وارد منافذ فراخ‌تر گردید، آب به منافذ باریک‌تر، رانده می‌شود و بر اساس قانون پوایزل شدت جریان از یک لوله متناسب با توان چهارم شعاع آن است. این تفسیرها به سهم خود درست هستند، اما تنها بخشی از واقعیت را بیان می‌کنند. با خشک شدن خاک، کسری از حجم خاک که توسط مسیرهای پر از آب در حال جریان، اشغال شده است، کاهش

می‌یابد. این مسیرهای باقیمانده، پراعوجاج‌تر بوده و فاصله بیشتری از هم دارند (زیرا مسیرهای پیوسته کمتری در واحد حجم وجود دارد)؛ کسر دیگری از حجم منافذ پر از آب، از این مسیرها جدا هستند و بجز از طریق جریان غشایی، سهمی در جریان ندارند.

از نظر تئوری، WRC در نقطه تعادل اندازه‌گیری می‌شود، اما در عمل، وقتی WRC با استفاده از روش صفحات فشاری اندازه‌گیری می‌شود، خاک هر چه قدر خشک‌تر می‌شود از تعادل عقب‌تر می‌افتد. چون مسیرهای پر از آب، ناپیوسته می‌شوند، لذا نرخ خروج آب از نمونه خاک در فشارهای بالا (رطوبت کم) به سرعت کاهش می‌یابد، بطوریکه حوصله ما سر می‌رود و قبل از تعادل نمونه را برمی‌داریم. این امر موجب ایجاد خطا در رطوبت اندازه‌گیری شده در آن فشار و تجمع خطاها در اندازه-گیری‌های بعدی می‌شود. یعنی آبی که "باید" زهکشی می‌شد و نشده است به فشارهای "تعادلی" بعدی- یعنی به منافذی کوچک‌تر از منافذی که آب واقعا در آنها نگهداری می‌شود، یا در مورد آخرین فشار به آب باقیمانده- نسبت داده می‌شود.

تصویر ارایه شده در فوق تا حدی توسط جریان غشایی آب در سطوح ذرات جامد تعدیل می‌شود. این غشاها، پیوستگی بین منافذ پر از آب، که در غیر این صورت منقطع می‌ماندند، را برقرار می‌کند: در حضور این غشاهای آب، آب می‌تواند از هر منفذی خارج شود (شرط سوم فوق). اما چون جریان غشایی بسیار کندتر از جریان در منافذ پر از آب است، منافذ پر از آبی که از مسیرهای جریان منفک شده‌اند، فوق‌العاده کند زهکشی می‌شوند و لذا عملا ما صبر نمی‌کنیم تا تخلیه شوند و نمونه را برمی‌داریم. در پایان فرآیند اندازه‌گیری، آب باقیمانده ترکیبی از آب موجود در مکان‌های گوناگون است: غشاهای نازک، برآمدگی‌ها و فرورفتگی‌های سطحی، پل‌های مویینگی در نقطه اتصال ذرات جامد، منافذ پر از آبی که مجاز هستند اما دسترس‌پذیر نیستند، و منافذ پر از آبی که در زمان تخصیص یافته، زهکشی نشده‌اند. در عمل، تلاش زیادی برای بررسی این اثرات انجام نشده است.

پسماند

فرآیند جذب از چندین جهت متفاوت از زهکشی است. با توجه به مفهوم اثر "منفذ کوزه‌ای"، زهکشی یک منفذ توسط شعاع گردن آن کنترل می‌شود، در حالیکه جذب توسط شعاع بدنه منفذ کنترل می‌گردد. بنابراین، اثر منفذ کوزه‌ای، تفسیری ساده از پسماند است، اما بر خلاف تاکید تقریبا جهان‌شمول بر آن در کتب فیزیک خاک، نقش منفذ کوزه‌ای در پسماند تقریبا به اندازه یک فاکتور مقیاس است که به صورت نسبت از فشار بیان می‌شود. پسماند در تر و خشک شدن یک محیط متخلخل به طور اساسی‌تر ناشی از تمایز بین مجاز بودن و دسترس‌پذیری است، و تنها با در نظر گرفتن آن می‌توان (برای مثال) منحنی تر شدن را از روی منحنی خشک شدن بدست آورد. این تمایز، در ادغام با اختلاف بین تر شدن و خشک شدن، به آب اجازه می‌دهد که از طریق غشاهای نازک از منافذ فرار کند، در حالیکه هوا نمی‌تواند. در نتیجه، هوا در منافذ فراخ به دام می‌افتد؛ به همین دلیل، منحنی تر شدن به ندرت به اشباع کامل می‌رسد. پسماند و احتباس، تجلی بسیار ماکروسکوپیک از تمایز دقیق در مقیاس منفذ بین مجاز بودن و دسترس‌پذیری منافذ است.

بدست آوردن موفق PSD از روی WRC

یک لوله موبین منفرد می‌تواند مدلی مفید از یک منفذ منفرد باشد، اما ارتقا مقیاس از لوله منفرد به کل محیط متخلخل پیچیده به سادگی افزودن لوله‌های بیشتر نیست! نسبت دادن پسماند در مقیاس محیط متخلخل به پسماند در چند لوله کوزه‌ای شکل با این مشکل روبروست که نمی‌توانیم اتصال و بی‌نظمی را در ارتقا مقیاس لحاظ کنیم. اما اتصال و ارتقا مقیاس به دقت در حوزه تئوری تراوش (شاخه‌ای از ریاضیات و از مبحث اصلی مکانیک آماری مدرن) قابل انجام هستند، در حالی که ایجاد مدلی آرمانی از محیط بی‌نظم یکی از مشکلات ذاتی در فیزیک است.

تمایز بین مجاز بودن و دسترس‌پذیری نیز از طریق متغیری در تئوری تراوش در نظر گرفته می‌شود که این متغیر بیانگر کسری از منافذ متصل به خوشه گسترده در طول نمونه (sample-spanning cluster) است. می‌توان از این تمایز (برای مثال)

جهت برآورد منحنی تر شدن از روی PSD یا منحنی خشک شدن WRC، اثرات شرایط تر شدن-مختلط بر منحنی‌های خشک و تر شدن، و بعد فراکتالی سیال باقیمانده در شرایط دو و سه بعدی استفاده کرد.

اثرات ارتفاع و دسترس‌پذیری بر WRC، ناچیز نیست؛ بسته به در نظر گرفتن یا نگرفتن این اثرات در تجزیه دادها، PSDهای کاملا متفاوتی بدست می‌آید. PSDهای متفاوت منجر به برآوردی کاملا متفاوت از $K(\theta)$ و سایر ویژگی‌های انتقال می‌گردد، زیرا این اثرات به شدت بر حجم منتسب به منافذ فراخ‌تر تاثیر می‌گذارند. از این اساسی‌تر، اندازه واقعی منفذ از ارتفاع نمونه تاثیر نمی‌پذیرد، در حالیکه نگهداشت آب اندازه‌گیری شده، از آن تاثیر می‌پذیرد. حذف اثرات مقیاس و دسترس‌پذیری از WRC، سبب حذف اثرات مصنوعی خاص اندازه‌گیری‌ها، گشته و ما را به داده‌هایی که ما واقعا باید بدانیم و استفاده کنیم، نزدیک‌تر می‌کند.

سخن آخر

اما برای اینکه عصر حاضر به عصر سیاه الکترونیک تبدیل نشود و برای ما به طور مشخص، علوم خاک همچنان به عنوان یک علم باقی بماند، باید طوری آموزش دهیم و آموزش ببینیم که صرفا برای کسب درآمد و بدون تعلق خاطر وارد علوم خاک نشویم، بلکه مشتاق باشیم بدانیم که چه چیزهایی، چگونه و چرا در خاک- این دنیای پیچیده و شگفت‌انگیز- رخ می‌دهند. کار پیشینیان را با نگاهی نو بکاویم و با دگراندیشی و نگاهی منتقدانه، جانی تازه به یافته‌های قدیمی بدهیم، لذت استفاده از مفاهیم و فنون سایر حوزه‌های به ظاهر نامرتبط یا کم ارتباط را در پژوهش‌های خاک بچشیم تا شاید راه حلی برای معمای قدیمی علوم خاک و محیط زیست بیابیم و از ابزارهای نو و از فناوری به عنوان چشمی برای مشاهده بهتر و از کامپیوتر و مدل به عنوان ابزاری برای عمق بخشیدن به تئوری‌ها و یافته‌ها استفاده کنیم. **دنیا و خاک هنوز پیچیده هستند و کاوشگرانی کوشا، تیزبین، دیرباور، مشتاق، جاه‌طلب و فروتن می‌خواهد که آنها را کشف کنند.**

منابع

Bartolo S.D., Otten W., Cheng Q. and Tarquis A.M. 2011. Preface: "Modeling soil system: complexity under your feet". Biogeosciences, 8: 3139–3142.

Dullie, F.A.L. 1992. Porous media: Fluid transport and pore structure. 2nd ed. Academic Press, San Diego.

Hunt A.G., Ewing R.P. and Horton R. 2013. What's wrong with soil physics? Soil Science Society of America Journal, 77:1877–1887.

Philip J.R. 1991. Soils, natural science, and models. Soil Science, 151: 91-98.

Richte, D.deB. and Yaalon D.H. 2011. "The changing model of soil" revisited. Soil Science Society of America Journal, 76:766–778.

Vereecken H., Schnepf A., Hopmans J.W. et al. 2016. Modeling soil processes: Review, key challenges, and new perspectives. Vadose Zone Journal, 15: 1-57.

Soils and Modeling: Finding Simplicity in Complexity

Habib Khodaverdiloo
Dep. Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. Email: h.khodaverdiloo@urmia.ac.ir

Abstract
A brief review was provided about the scientific standards and their place among the current scientific community. Modeling based on over-simplified theories and over-use of models without accurate input data and/or wise interpretations was disapproved and users were advised to revise the theories and to search for updated methods to collect more accurate input data. Some specific examples in soil physics were then provided to illustrate the mis-modeling or mis-interpretation of the real phenomena due to applying of inappropriate basic theories. Finally, the percolation theory was introduced as an alternative for better obtaining of these physical soil properties.

Keywords: Model, Percolation theory, Pore size distribution, Soil water retention curve.