



Soil Hydraulic Conductivity: A Review of Chemical, Physical, and Biological Effects

Seyed Alireza Sheykhan¹ | Ali Dalir Gabrabad² | Mohammad Amin Abdollahi³

1. Corresponding Author, M.Sc. Student in Irrigation and Drainage, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: alireza.sheykhan@ut.ac.ir
2. M.Sc. Student in Water Resources Engineering, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: alidalir@ut.ac.ir
3. Ph.D. Student in Water Resources Engineering, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: amin.abdollahi1379@yahoo.com

Article Info	ABSTRACT
Article type: Original article	Saturated hydraulic conductivity (K_s) is one of the most important parameters for understanding water transport and retention in soil. This parameter is influenced by physical, chemical and biological factors. The aim of this study is to review some of the experimental evidence on the temporal and spatial variations of hydraulic conductivity. First, the role of tillage management, including compaction caused by agricultural machinery traffic in the field, is investigated. Here, it is shown that plowing initially causes a temporary increase in capillary conductivity but in the long term it will cause a significant decrease. Soil conservation methods maintain soil biological activities such as soil organisms and root development and macropore connectivity. Next, we will discuss soil texture and soil organic matter content. Soil organic matter content usually enhances soil hydraulic conductivity, but dissolved organic matter will cause soil degradation under certain conditions. From a chemical perspective, an increase in the percentage of exchangeable sodium and a deficiency of alkaline earth group cations lead to the dispersion of colloidal particles in the soil and a decrease in the hydraulic conductivity. The ratio of potassium to sodium, salinity and pH value in irrigation water play a decisive role in the flow of water in the soil. In another section, the role of roots and root morphology and the type of vegetation cover in changes in hydraulic conductivity is examined. Finally, the decisive role of combined physical, chemical and biological research in this matter is mentioned.
Article history:	
Received: Oct. 20, 2026	
Revised: Nov. 19, 2026	
Accepted: Feb. 08, 2026	
Published online: Jul. 18, 2026	
Keywords: <i>Hydraulic Conductivity, Tillage, Soil Management, Soil Organic Matter, Soil Texture.</i>	
Cite this article: Sheykhan, S., Dalir Gabrabad, A., Abdollahi, M., (2026) Soil Hydraulic Conductivity: A Review of Chemical, Physical, and Biological Effects, <i>Scientific-Promotional Journal of Aquifer</i> , 21 (1).	
Publisher: The University of Tehran Press.	



هدایت هیدرولیکی خاک: مروری بر تأثیرات شیمیایی، فیزیکی و زیستی

سید علیرضا شیخان^۱ | علی دلیر گبرآباد^۲ | محمدامین عبداللهی^۳

۱. نویسنده مسئول، دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آب گرایش آبیاری و زهکشی، گروه آبیاری آبادانی دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه:

alireza.sheykhan@ut.ac.ir

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آب گرایش منابع آب، گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: alidalir@ut.ac.ir

۳. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آب گرایش منابع آب، گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: amin.abdollahi1379@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۹ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۲۷ واژه‌های کلیدی: هدایت هیدرولیکی، خاکورزی، مدیریت خاک، بافت خاک، ماده آلی خاک،	هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) یکی از مهم‌ترین پارامترها برای درک انتقال و نگهداشت آب در خاک می‌باشد. این پارامتر تحت تأثیر عوامل فیزیکی، شیمیایی و بیولوژی است. هدف از این مطالعه، بررسی تعدادی از شواهد تجربی در مورد تغییرات زمانی و مکانی هدایت هیدرولیکی در پژوهش‌های مختلف است. در ابتدا نقش مدیریت خاک‌ورزی از جمله تراکم حاصل از تردد ماشین‌آلات کشاورزی در مزرعه بررسی شده‌است. همچنین نشان داده شده‌است که شخم در ابتدا باعث افزایش موقت هدایت موئینه می‌شود اما در بلند مدت موجب افت قابل توجه خواهد شد. روش‌های حفاظتی خاک، فعالیت‌های بیولوژی خاک مانند موجودات خاکزی، توسعه ریشه و پیوستگی ماکروپورها را حفظ می‌کند. در ادامه به بررسی بافت خاک و مقدار ماده آلی خاک خواهیم پرداخت. مقدار ماده آلی خاک معمولاً هدایت هیدرولیکی خاک را تقویت می‌کند اما ماده آلی محلول در شرایط خاص باعث تخریب خاک خواهد شد. از منظر شیمیایی افزایش درصد سدیم قابل تبادل و کمبود کاتیون‌های گروه قلیایی خاک، منجر به پراکندگی ذرات کلئیدی خاک و کاهش مقدار هدایت هیدرولیکی می‌شود. نسبت پتاسیم به سدیم، شوری و مقدار pH در آب آبیاری نقش تعیین‌کننده بر جریان آب در خاک دارد. در بخش دیگر به بررسی نقش ریشه و مورفولوژی ریشه و نوع پوشش گیاهی در تغییرات هدایت هیدرولیکی پرداخته شده‌است. در پایان نیز به نقش تعیین‌کننده پژوهش‌های ترکیبی فیزیکی، شیمیایی و بیولوژی در این موضوع اشاره شده‌است.

استناد: شیخان؛ سید علیرضا، دلیر گبرآباد؛ علی، عبداللهی؛ محمدامین، (۱۴۰۵) هدایت هیدرولیکی خاک: مروری بر تأثیرات شیمیایی، فیزیکی و زیستی، نشریه علمی-ترویجی آبخوان، ۲۱ (۱).

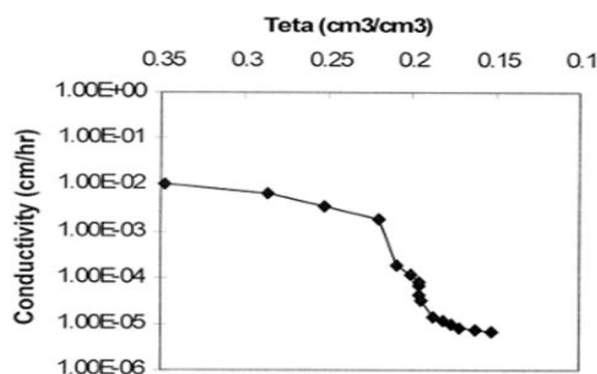
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

هدایت هیدرولیکی خاک یک پارامتر کلیدی خاک است که چگونگی حرکت آب و نگهداشت آب در خاک را شرح می‌دهد (Usowicz, Lipiec, 2021). خاک یک محیط متخلخل است و از منافذ متعدد با ابعاد و اشکال متفاوت تشکیل شده است. تعیین حرکت آب در منافذ خاک کاری دشوار است و به همین خاطر، تئوری لوله‌های موازی این حرکت را به صورت مدلی ساده شرح می‌دهد. هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) زمانی است که خاک کاملاً اشباع از آب است و بیش‌ترین مقدار هدایت هیدرولیکی در این نقطه وجود دارد و هدایت هیدرولیکی غیر اشباع (K) حالتی است که فقط بخشی از ظرفیت از آب اشباع شده است و منافذ ریز در این عمل نقش دارند. هدایت هیدرولیکی پارامتری مهم برای ارزیابی ظرفیت انتقال آب و یون‌های محلول در آب در ساختار متخلخل خاک به شمار می‌رود و در حفظ تعادل چرخه هیدرولوژیک، نقش مهمی ایفا می‌کند. این ویژگی نه تنها بر مکانیسم‌های نفوذ آب بلکه بر تشکیل رواناب سطحی و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی نیز اثرگذار است و در کاهش فرسایش خاک، پایداری اکوسیستم‌های طبیعی و زراعی و از همه مهم‌تر در مدیریت سیستم‌های آبیاری و زهکشی، کاربرد دارد (Benjamin et al., 2008). با توجه به شرایط حال حاضر جهان، تغییرات اقلیمی مرتب رو به افزایش است و فشار بر منابع آب و خاک بیش‌تر شده است و در نتیجه دستیابی به شناخت جامع از عوامل مؤثر بر هدایت هیدرولیکی خاک، پیش‌نیاز مدیریت درست و پایدار این منابع محسوب می‌شود.

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) و غیر اشباع خاک، پویا بودن و گستردگی تغییراتش با توجه به بعد زمان و مکان است. این پارامتر، به عنوان یک ویژگی بسیار متغیر، تحت تأثیر فرآیندهای طبیعی و انسانی است. در واقع، اجرای رویکردهای مدیریتی متنوع از جمله روش‌های گوناگون شخم‌زنی، روش‌های مختلف آبیاری با کیفیت آب‌های متفاوت و گونه‌های گیاهی متغیر می‌تواند مقدار K_s را حتی بیشتر از حد قابل تصور، تغییر دهد (Strudley et al., 2008; Assouline & Narkis, 2011). K_s در مقیاس متفاوت اثر خود را می‌گذارد، از تفاوت‌های کوچک در سطح یک مزرعه کوچک (مانند خط تردد ماشین‌آلات و فواصل میان ردیف‌های کشت) گرفته تا نوسانات وسیع‌تر در سطح یک دشت یا حوضه هیدرولوژیک. از لحاظ زمانی نیز این تغییرات به همین اندازه متنوع است و از تغییرات سریع و ساعتی (بلافاصله پس از رویداد آبیاری یا بارش) گرفته تا تغییرات تدریجی در بازه‌های طولانی مدت سالانه (که ریشه در استراتژی‌های مدیریتی بلندمدت دارد) را شامل می‌شود (Hu et al., 2013).

منحنی مشخصه رطوبتی از مهم‌ترین مشخصه‌های فیزیکی خاک است و نشان‌دهنده رابطه بین مکش ماتریک و رطوبت خاک است. مکش ماتریک با رطوبت خاک رابطه معکوس دارد. هدایت هیدرولیکی غیر اشباع که در بعضی از مواقع به هدایت موئینه نیز شناخته می‌شود به صورت تابعی از رطوبت یا مکش ماتریک خاک تعریف می‌شوند. یکی از روش‌های مناسب تعیین مقادیر هدایت هیدرولیکی در حالت غیر اشباع، استفاده از معادلات نظری دارسیس و پوازی (لوله‌های موازی) و منحنی مشخصه آب خاک با فرض پیوستگی حفره‌های موجود در خاک و تشکیل مجاری استوانه‌ای است (Van Genuchten et al., 1991). مهم‌ترین مدل فیزیکی موجود برای منحنی هدایت هیدرولیکی مدل معلم-وان گنوختن است که بر اساس توزیع اندازه منافذ خاک بدست آمده است (Rezaie et al., 2004). در شکل ۱، انصاری و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از نرم‌افزار RETC، منحنی هدایت هیدرولیکی را نسبت به رطوبت تعیین کردند. توابع انتقالی خاک (PTFs) برای پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی به طور غیرمستقیم براساس ویژگی‌های و پارامترهای زودیافت خاک، به کار برده می‌شوند. این مدل برای چندین دهه مورد استفاده قرار گرفته است اما اعتبار آن در تغییرات مکانی هنوز دارای ابهام است (Zhang et al., 2020).



شکل ۱: منحنی هدایت هیدرولیکی و رطوبت (انصاری و همکاران، ۱۳۹۳)

این مقاله با هدف جمع‌آوری یکپارچه کلیدی‌ترین عوامل مؤثر بر هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) گردآوری شده‌است. عوامل مورد بررسی، جنبه‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک را شامل می‌شوند. اجزای اصلی مورد بررسی در این مقاله شامل رویکردهای مدیریتی خاک و کشاورزی، خصوصیات شیمیایی خاک، کیفیت آب مورد استفاده در آبیاری، و تأثیر سیستم ریشه گیاهان است. تمرکز اصلی این پژوهش بر چگونگی اثرات این عوامل و نقش مدیریت تعاملات پیچیده در کنترل تغییرات مکانی و زمانی هدایت هیدرولیکی است.

عوامل فیزیکی و مدیریتی مؤثر در هدایت هیدرولیکی خاک

روش‌های متنوع خاکورزی

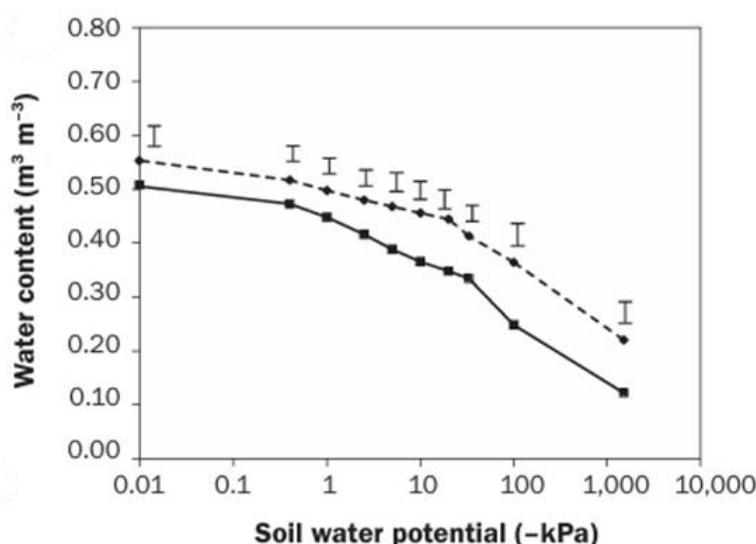
خاک‌ورزی، به عنوان یکی از قدرتمندترین و مهم‌ترین عوامل مدیریتی در سطح مزرعه، تأثیر مستقیم بر ویژگی‌های فیزیکی خاک دارد. اثرات این فعالیت‌ها بر هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s)، عمدتاً از طریق دگرگونی‌ها و جابجایی‌هایی که در ساختار خاک و شبکه کانال‌ها و منافذ آن ایجاد می‌شود، اعمال می‌گردد. به دلیل تغییرات طبیعی بالا در فضا و زمان، هدایت هیدرولیکی اغلب پارامتر ضعیفی از پاسخ هیدرولیکی خاک به روش‌های مدیریتی است. از اساسی‌ترین ویژگی‌های خاک که بر فرآیندهای هیدرولیکی تأثیر می‌گذارد، جرم مخصوص ظاهری خاک و تخلخل (موثر) است که هر دو مرتبط با شیوه‌های خاک‌ورزی هستند. چند اصطلاحات رایج در خاک‌ورزی می‌توان به مواردی همچون: خاک‌ورزی مرسوم (CT)، شخم زدن اسکنه (CP) و شخم برگردان (MP)، حفاظت یا حداقل خاک‌ورزی (MT)، و سیستم‌های بدون خاک‌ورزی (NT) است که هر کدام اثرات فیزیکی مختلفی بر روی خاک می‌گذارند.

خاک‌ورزی مرسوم Conventional Tillage یا (CT) این روش، اگرچه در کوتاه‌مدت و به واسطه خرد کردن توده‌های بزرگ خاک (کلوخه‌ها) ممکن است باعث افزایش موقتی K_s شود، اما این اثر دوام چندانی ندارد. در بلندمدت، خاک‌ورزی مرسوم به دلیل تخریب پیوستگی حفره‌های بزرگ (ماکروپورها) که توسط ریشه‌ها و فعالیت کرم‌های خاکی ایجاد شده‌اند، در نهایت موجب افت K_s می‌گردد (Strudley et al., 2008). به عنوان مثال، مطالعه‌ای توسط Mudgal و همکاران (۲۰۱۰) نشان داد که هدایت هیدرولیکی اشباع در خاکی که به طور مداوم تحت کشت ردیفی قرار داشت، تا ۵۷ برابر کمتر از همان خاک در شرایط علفزار بومی و دست‌نخورده بود. در خاک‌ورزی حفاظتی بدون شخم (NT) افزایش کمی در چگالی ظاهری خاک در لایه‌های سطحی اتفاق می‌افتد، اما حفظ پیوستگی کانال‌های درشت‌تر (ماکروپورها مانند سوراخ‌های ناشی از فعالیت کرم‌های خاکی یا بقایای ریشه‌های گیاهی به عنوان یک ویژگی مثبت تلقی می‌شود. این ثبات در ساختار منافذ، زیربنای مناسبی برای توسعه جریان‌های ترجیحی (Preferential Flow) فراهم می‌آورد و در پی آن، به تثبیت یا بهبود سطوح K_s کمک شایانی می‌کند (Benjamin, 1993). مسیر حرکت چرخ ماشین‌آلات در شیوه‌های خاک‌ورزی بسیار تأثیر گذار است و یکی از دلایل موفقیت سیستم‌های بدون خاک‌ورزی و یا حداقل خاک‌ورزی، همین مورد است. Liebig و همکاران (۱۹۹۳) تراکم را در مسیرهای چرخ دائمی یک سیستم خاک‌ورزی پشته‌ای بر روی یک لوم رسی سیلتی در جنوب شرقی نبراسکا، ایالات متحده آمریکا مطالعه کردند. میانگین مقادیر K_s در مسیر چرخ‌ها تقریباً ۲۵ درصد میانگین مقادیر مناطق بدون تردد بود.

تراکم مکانیکی (فشردگی خاک)

یکی از ویرانگرترین مکانیسم‌هایی که به کاهش چشمگیر K_s منجر می‌گردد، فشردگی خاک ناشی از تردد تجهیزات کشاورزی است. این فشار مکانیکی، به طور مستقیم، پیوستگی حفره‌های درشت خاک را مختل می‌سازد و حجم آن‌ها را به شدت کاهش می‌دهد، که در نتیجه، مسدود شدن کانال‌های اصلی عبور آب (جریان ترجیحی) را به همراه دارد. اثرات فشردگی خاک، به طور کلی، از دوام بالایی برخوردارند. برای نمونه، پژوهش‌ها نشان می‌دهند که حتی پس از سپری شدن ۹ سال، مقدار K_s در نواحی تحت تأثیر فشردگی می‌تواند تا ۹۸ درصد نسبت به شرایط اولیه افت کند (Alakukku, 1996b). Chang و Lindwall در سال‌های ۱۹۸۹، ۱۹۹۰ و ۱۹۹۲ میلادی اثرات تیمارهای خاک‌ورزی را بر خاک لومی در کانادا اندازه‌گیری کردند و دریافتند که جرم مخصوص ظاهری خاک در تناوب‌های زراعی تفاوتی ندارد. با این حال، پس از ۱۰ سال NT با گندم زمستانه، چگالی ظاهری بیشتری نسبت به CT داشت. Alakukku (۱۹۹۶) به مدت ۹ سال اثر حرکت تجهیزات را در مزرعه‌ای با بافت خاک رسی سنجید و هدایت هیدرولیکی اشباع و مقدار ماکروپورها به ترتیب بین ۶۰ تا ۹۸ درصد و ۳۷ تا ۷۰ درصد کاهش یافتند. به طور واضح و دائم، شخم باعث کاهش مقدار هدایت هیدرولیکی و از بین رفتن ماکروپورها می‌شود. نتایج بالا به صورت مشخصی بر بروی درصد رطوبت خاک و ظرفیت نگهداشت آب اثر گذار است. Brandt (۱۹۹۲) تحقیقی به مدت ۱۲ سال بین شخم مرسوم (CT) و NT انجام داد و دریافت که NT منجر به افزایش مقدار آب خاک (SWC) در ۹ مورد از ۳۶ مورد شد و در

مابقی تفاوت معناداری نداشت. نتایج آزمایشگاهی و مزرعه‌ای Mahboubi و همکاران (۱۹۹۳) نشان داد که نگهداری آب در NT بیشتر از CT بوده است. همه نتایج منجر به پیشنهاد یک شیوه NT اصلاح شده برای حداکثر کردن خواص هیدرولیکی مفید خاک شد. Mudgal و همکاران نیز در سال ۲۰۱۰ میلادی اثر خاکورزی با کشت ردیفی و خاکورزی بدون شخم را بررسی کردند و نتیجه با بقیه پژوهشگران همسو بود. نتایج در شکل ۲ آورده شده است. Franzluebbers و همکاران (۱۹۹۵) توزیع عمق خاک SWC و فضای منافذ پر از آب را در یک خاک لوم رسی سیلتی بررسی کردند و دریافتند که CT به طور مداوم خشک شدن سریع تری را نسبت به NT تجربه می کند. در واقع، میانگین سالانه فضای منافذ پر از آب برای NT در تمام اعماق خاک به دلیل پوشش بقایای خاک به طور مداوم بیشتر بود.



شکل ۲: اثرات رویکردهای مدیریتی بر ظرفیت نگهداری آب در لایه ۳۰ تا ۴۰ سانتی متری خاک را به نمایش می گذارد: خط مربوط به زمینی که تحت کشت ردیفی بلندمدت قرار دارد و خطچین مربوط به زمینی که هرگز شخم زده نشده است (Mudgal et al., 2010).

بافت و ساختمان خاک

توزیع اندازه ذرات خاک، که به عنوان بافت ذاتی آن شناخته می شود، در شکل دهی به واکنش پذیری خاک در برابر اقدامات مدیریتی، ایفای نقش اساسی دارد. باید توجه داشت که هرچند مقادیر اولیه K_s در خاک های با بافت ریز (مانند انواع رسی)، به طور قابل ملاحظه ای پایین است، اما تغییرات نسبی این شاخص در پاسخ به مدیریت، می تواند به مراتب چشمگیرتر از آنچه در خاک های درشت بافت (شنی) مشاهده می شود، باشد (Scanlan, 2009). از سوی دیگر، ساختمان خاک، عمدتاً به پایداری کلوخه ها یا aggregates اشاره دارد. به عنوان یک معیار برجسته و تعیین کننده در نظر گرفته می شود. پایداری این aggregates، پیوند محکم تری با سطوح K_s برقرار می سازد تا آنچه از محتوای کربن آلی خاک به تنهایی انتظار می رود. Hammel (Benjamin et al., 2008) اثرات خاک ورزی و تناوب را بر جرم مخصوص ظاهری خاک در شمال آیداهو پس از ۱۰ سال تیمارهای خاکورزی پیوسته (MP)، اسکنه و NT بررسی کرد و دریافت که خاک ورزی تأثیر قابل توجهی بر جرم مخصوص ظاهری دارد.

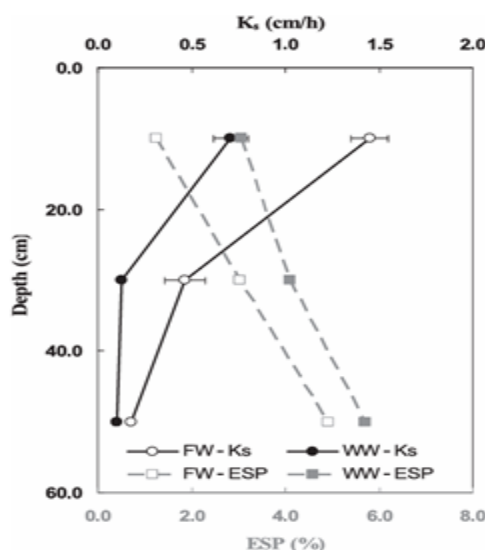
Takele و همکاران در پژوهشی در سال (۲۰۰۵) دریافتند که تغییر پذیری در هدایت هیدرولیکی به صورت معنی داری به توزیع درصد مقدار ماسه و سیلت در خاک بستگی دارد اما در گستره وسیع تر، تغییر پذیری در هدایت مؤئینه تنها به مقدار رس و کربن آلی خاک وابسته است و این یکی از نتایج ارتباط هدایت هیدرولیکی با فیزیکی های فیزیکی خاک است. Adeyemo و همکاران در سال ۲۰۲۲ به بررسی اثر هیسترسیس (پسماند رطوبتی) بر تغییرات هدایت هیدرولیکی پرداختند و به نتایجی رسیدند. خاک رس تحت شور و سدیمی شدن بیش تر مستعد تخریب نسبت به خاک های با بافت درشت تر هستند. در این پژوهش به این نتیجه رسیدند که خاک نسبت به بازسازی خود بسیار مقاوم است و هدایت هیدرولیکی در برگشت به مقدار اولیه خود باز نمی گردد.

عوامل شیمیایی تأثیر گذار

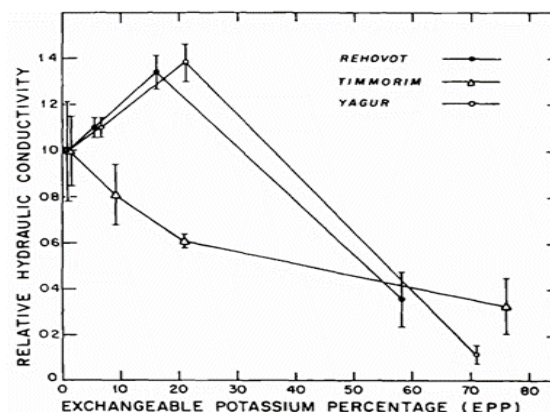
کاتیون های تبدالی: سدیم در مقابل پتاسیم خصوصیات شیمیایی خاک، به ویژه آرایش کاتیون های قابل مبادله، در شکل گیری و حفظ

پایداری ساختار خاک، نقشی محوری بر عهده دارند. در این زمینه، نسبت میان کاتیون‌های تک‌ظرفیتی (از قبیل سدیم Na^+ و پتاسیم K^+) و کاتیون‌های دوظرفیتی (مانند کلسیم Ca^{2+} و منیزیم Mg^{2+}) به عنوان شاخصی کلیدی عمل می‌کند که ثبات کلوخه‌ها و aggregates خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در واقع، ترکیب کاتیونی خاک با تمرکز بر این نسبت میان کاتیون‌های تک‌ظرفیتی و دوظرفیتی تأثیر قاطعی بر دوام و استحکام ساختمان خاک اعمال می‌نماید. درصد سدیم قابل تبادل (Exchangeable Sodium Percentage یا ESP) اثر تخریب‌کننده‌ای بر ساختمان خاک ایجاد می‌کند. شوری خاک و سدیم حاصل از آبیاری با آب شور به طور گسترده در جهان مشاهده شده‌است. یون سدیم (Na^+)، زمانی که در فرم هیدراته قرار می‌گیرد، با شعاع گسترده‌اش، نیروی دفعه‌ای قابل ملاحظه میان ذرات کلوئیدی رس القا می‌کند که این پدیده، به نوبه خود، منجر به پراکندگی و تجزیه ساختار خاک می‌گردد. تأثیر سدیم بر نفوذپذیری خاک به طور کلی در مقایسه با پتاسیم نامطلوب‌تر است (Chen et al., 1983). در حالی که سدیم تمایل به افزایش تورم و پراکندگی ذرات رس دارد و منجر به کاهش نفوذپذیری می‌شود، پتاسیم می‌تواند به حفظ پایداری توده‌ها در غلظت‌های پایین‌تر کمک کند. مقادیر پایین ESP حتی در حد پنج درصد می‌تواند با ایجاد تورم داخلی در شبکه ذرات و پراکندگی ذرات رس می‌تواند منجر به جداسازی سنگدانه‌ها می‌شود. این پراکندگی به این دلیل حضور Na به عنوان یک کاتیون تک‌ظرفیتی است که در مقایسه با کاتیون‌های دو ظرفیتی مانند کلسیم (Ca) یا منیزیم (Mg) به طور مؤثر ذرات رس را تثبیت نمی‌کند و به کاهش چشمگیر هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) منجر می‌شود (Assouline & Narkis, 2011).

در قیاس با سدیم، درصد پتاسیم قابل مبادله (Exchangeable Potassium Percentage یا EPP) تنها در سطوح غلظتی به مراتب بالاتر قادر به ایجاد اثری مشابه در کاهش K_s است. پژوهش‌های چن و همکاران این موضوع را مشخص کرد که برای کاهش ۸۰ درصدی در K_s ، باید ۶۰ تا ۷۵ درصد از سطوح تبدالی توسط پتاسیم اشغال گردد، حال آنکه همین میزان افت با حضور تنها ۱۰ تا ۱۶ درصد سدیم قابل تبادل امکان‌پذیر می‌باشد. اثر پتاسیم بر هدایت هیدرولیکی پیچیده است. افزایش سطح پتاسیم تبدالی در ابتدا می‌تواند هدایت هیدرولیکی را تا یک حد معین (تقریباً ۲۰ درصد پتاسیم تبدالی) افزایش دهد. اما بالاتر از این نقطه، هدایت هیدرولیکی به شدت کاهش می‌یابد (Chen et al., 1983). غلظت نسبی بالاتر پتاسیم به سدیم در آب شور باعث پایداری خاکدانه‌های خاک می‌شود و خطر کاهش ماکروپورها ناشی از سدیمی شدن خاک را کاهش می‌دهد (Yan et al., 2023). سازوکار تأثیرگذاری پتاسیم، با تفاوت‌های قابل توجهی همراه است و عمدتاً از طریق آرایش مجدد ذرات ریز رس و انسداد حفره‌های کوچک، به این کاهش هدایت هیدرولیکی منجر می‌شود (Zhu et al., 2019). از عوامل مهم حفظ و توسعه اراضی آبی در مناطق خشک، استفاده از پساب فاضلاب شهری است. کریم زاده و همکاران (۱۳۹۱) در پژوهشی به بررسی اثر پساب به مدت پنج سال پرداختند و حاصل این بررسی این بود که کاهش هدایت هیدرولیکی در خاک‌های درشت دانه آبیاری شده با پساب کم‌تر از خاک‌های ریزدانه است و دلیل آن را احتمال گرفتگی منافذ ریز توسط مواد معلق موجود در پساب بیان کردند. در شکل ۳ نیز تغییرات هدایت هیدرولیکی اشباع برای دو نمونه آبیاری با پساب و آب شرب توسط Assouline & Narkis آورده شده‌است.



شکل ۳: ارتباط مقدار درصد سدیم قابل تبادل (ESP)؛ و هدایت هیدرولیکی اشباع، K_s برای نمونه‌های خاک آبیاری شده با FW (آب شرب) و WW (آب فاضلاب تصفیه‌شده) (Assouline & Narkis, 2011)



شکل ۴: هدایت هیدرولیکی نسبی در مقابل EPP (درصد پتاسیم قابل تبادل) میانگین $\pm$ انحراف معیار (Chen et al., 1983).

ماده آلی خاک (SOC) و ماده آلی محلول (DOM)

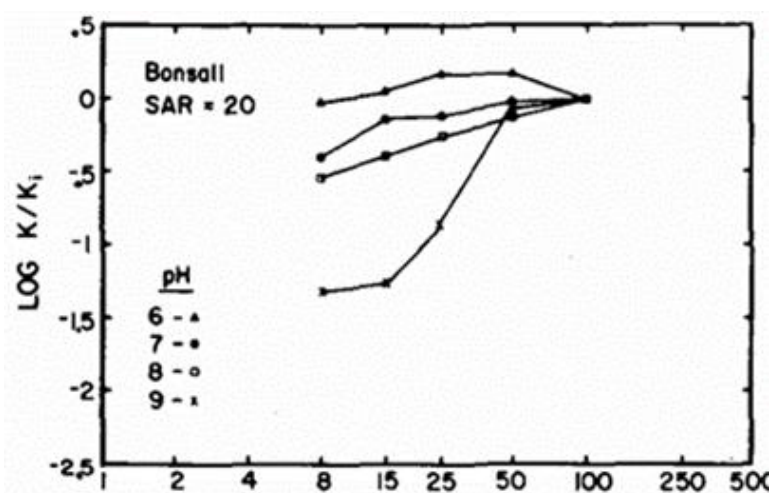
اثرگذاری کربن آلی خاک Soil Organic Carbon (SOC) یا (SOC) بر هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) غالباً به عنوان یک عامل مثبت تلقی می‌گردد؛ زیرا SOC عمدتاً پایداری کلوخه‌های خاک را ارتقا می‌بخشد و به تشکیل ساختاری متخلخل با حفره‌های درشت‌تر کمک می‌رساند. برای مثال، مدارک موجود حاکی از آن است که اعمال درمان‌های ترکیبی شامل کودهای شیمیایی و حیوانی (NPK+FYM) می‌تواند به طور قابل توجهی ذخایر SOC را افزایش دهد، قطر وزنی میانگین aggregates (MWD) را بهبود بخشد و در نهایت، سطوح K_s را بالا ببرد (Thangasamy et al., 2017). اثرگذاری کربن آلی خاک Soil Organic Carbon (SOC) یا (SOC) بر هدایت هیدرولیکی اشباع غالباً به عنوان یک عامل مثبت تلقی می‌گردد؛ زیرا SOC عمدتاً پایداری کلوخه‌های خاک را ارتقا می‌بخشد و به تشکیل ساختاری متخلخل با حفره‌های درشت‌تر کمک می‌رساند. برای مثال، مدارک موجود حاکی از آن است که اعمال درمان‌های ترکیبی شامل کودهای شیمیایی و حیوانی (NPK+FYM) می‌تواند به طور قابل توجهی ذخایر SOC را افزایش دهد، قطر وزنی میانگین aggregates (MWD) را بهبود بخشد و در نهایت، سطوح K_s را بالا ببرد (Thangasamy et al., 2017). برخلاف SOC، ماده آلی محلول (DOM) که در فاضلاب‌های تصفیه‌شده وجود دارد، قابلیت تأثیرگذاری دوجانبه را نشان می‌دهد. در یک موقعیت، DOM قادر است با ایجاد ترکیبات با کاتیون‌های دوظرفیتی (مانند کلسیم)، به عنوان عنصری عمل نماید که آثار مخرب درصد سدیم قابل تعویض (ESP) بر تجزیه را تشدید کند. در موقعیت دیگر، سطوح بسیار بالای DOM به طور مستقیم می‌تواند به بی‌ثباتی ساختار خاکدانه‌ها بیانجامد (Assouline & Narkis, 2011).

شوری، pH و ویژگی‌های آب مورد استفاده در آبیاری

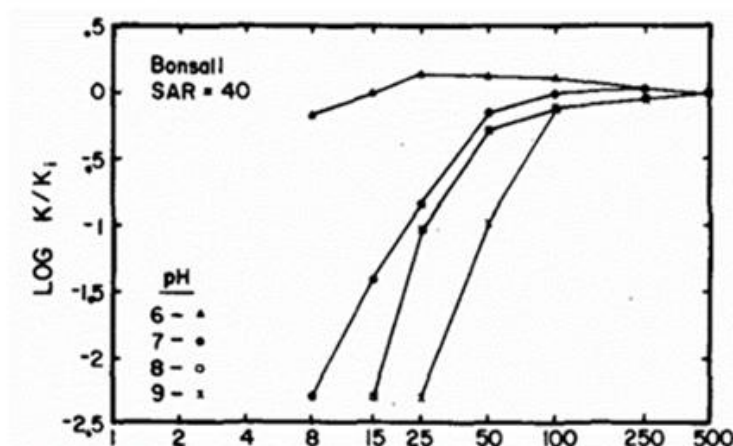
شوری (میزان الکترولیت‌ها) و pH آب به کاررفته در آبیاری، جایگاه کلیدی در تنظیم تأثیر درصد سدیم قابل مبادله (ESP) بر K_s ایفا می‌نمایند. در وضعیتی که سطح ESP خاک بدون تغییر باقی بماند، تقلیل غلظت الکترولیت‌های حل‌شده (مانند کم کردن غلظت آب آبیاری) و هم‌زمان افزایش اسیدیته، هر دو عنصر به تقویت جداسازی اجزای رس کمک نموده و در نهایت به کاهش K_s منجر می‌گردند (Suarez et al., 1984). این فرآیند افزایش آثار منفی زیادی، علی‌الخصوص در خاک‌هایی که شامل درصد رس زیاد با قابلیت بار سطحی تغییرپذیر (نظیر کائولینیت) می‌باشند، بروز بیشتری دارد. در دو شکل ۵ و ۶ مقدار لگاریتم هدایت هیدرولیکی در دو سطح SAR 20 و ۴۰ در pH 6، ۷، ۸ و ۹ رسم شده است. کاربرد کودهای شیمیایی اثری سازنده بر هدایت هیدرولیکی اعمال می‌نماید. (Thangasamy, 2017) و همکاران در تحقیقی به بررسی تأثیرات مواد مغذی اصلی مانند نیتروژن، فسفر، پتاسیم و گوگرد، و نیز تأثیر کود حیوانی (FYM) تمرکز کردند و به یافته‌هایی دست یافتند. رسانایی هیدرولیکی در ترکیب NPK + FYM به طور چشمگیری بیشتر از NPK، NP، N و NPKS و شاهد ارزیابی شد. اجرای ترکیبات NPK + FYM نرخ نفوذ را در مقایسه با گروه کنترل به میزان ۱۳۰ درصد ارتقا بخشید. در ترکیب NPKS، سطح نفوذ معادل با NPK مشاهده شد. ترکیبات NPK و NPKS نرخ نفوذ را نسبت به گروه کنترل به مقدار ۴۰ درصد افزایش دادند. در جدول ۱، مقدار هیدرولیکی و درصد کربن آلی خاک در دو عمق ۰ تا ۱۵ و ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متری برای هر تیمار کودی نوشته شده است.

جدول ۱: کاربرد تیمارهای مختلفی کودی و بررسی هدایت هیدرولیکی اشباع در دو عمق

تیمارها	کربن آلی خاک SOC (t/ha)		K _{sat} (cm/h)	
	۰-۱۵ سانتی متر	۱۵-۳۰ سانتی متر	۰-۱۵ سانتی متر	۱۵-۳۰ سانتی متر
عمق				
N	۱۰/۰۶	۱۰/۲	۰/۵۴۱	۰/۴۰۴
NP	۱۰/۸۱	۱۰/۲	۰/۵۵۷	۰/۳۸۶
NPK	۱۰/۵۹	۱۰/۸	۰/۶۹۱	۰/۴۱۲
NPK + FYM	۱۳/۸۱	۱۲/۹	۰/۷۶۱	۰/۴۷۲
NPKS	۱۱/۶۲	۱۱/۵	۰/۵۳۹	۰/۳۶۹
Control	۷/۹۴	۷/۳	۰/۴۴۵	۰/۳۳۵
آیش	۹/۸	۱۰/۸	۰/۴۶۵	۰/۳۵۷



شکل ۵: هدایت هیدرولیکی نسبی در مقابل غلظت الکترولیت در خاک با SAR = 20 و pH برابر با ۶، ۷، ۸ و ۹ در منطقه بنسال (Suarez et al., 1984)



شکل ۶: هدایت هیدرولیکی نسبی در مقابل غلظت الکترولیت در خاک با SAR = 40 و pH برابر با ۶، ۷، ۸ و ۹ در منطقه بنسال (Suarez et al., 1984)

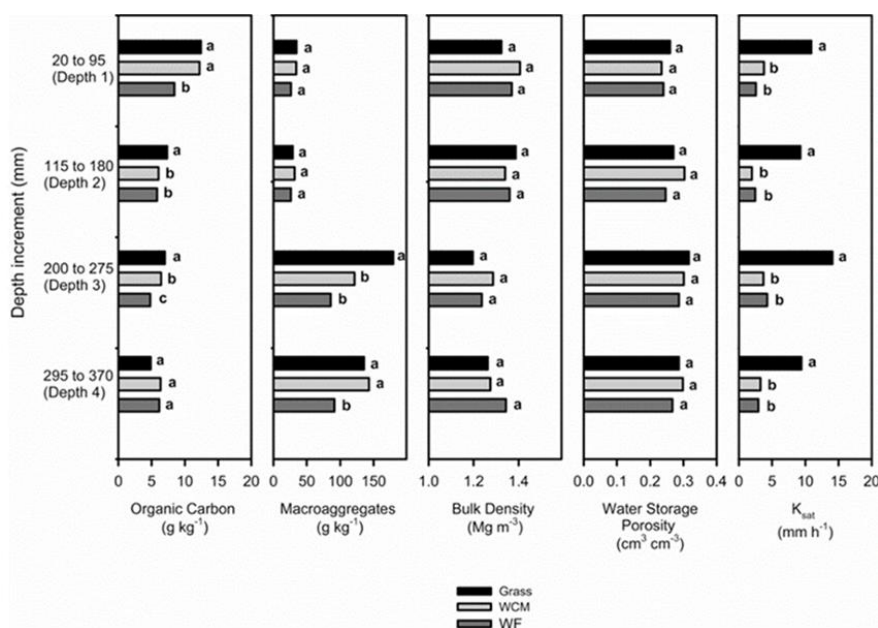
عوامل بیولوژیکی تأثیر گذار

تأثیرات بیولوژیکی ریشه‌های گیاهی بر هدایت هیدرولیکی

ریشه‌های گیاهی از راه طیفی از فرآیندهای فیزیکی و زیستی قادرند به طور معناداری بر خصوصیات هیدرولیکی خاک تأثیر بگذارند. تحقیقی گسترده توسط شی و همکاران (Shi et al., 2021) صورت پذیرفت که نشان داد گسترش و پیشرفت سیستم ریشه‌ای به طور میانگین می‌تواند K_s را تا ۴۶/۳ درصد و همچنین نرخ نفوذ پایدار (SIR) را تا ۱۴۴/۹ درصد ارتقا دهد. با این حال، درجه این اثرات مفید به شدت

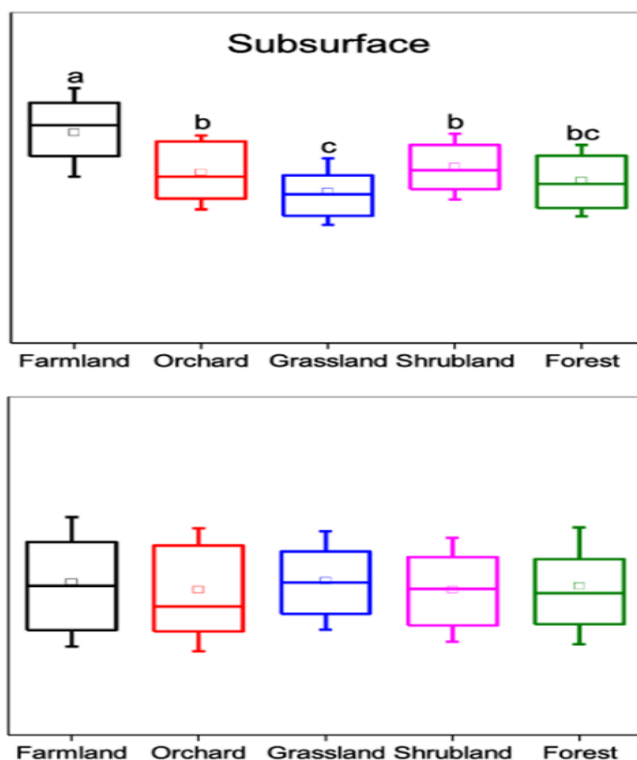
وابسته به شکل‌شناسی و آرایش ریشه غالب در مجموعه خاک و گیاه تحت بررسی است. از سوی دیگر، نوع کشت و پوشش گیاهی نیز منجر به تغییر الگو اراضی می‌شود و بر تراکم و ضریب هدایت هیدرولیکی اثرگذار است (Zhao et al., 2019). Zhao همکاران در سال ۲۰۲۱ به بررسی اثرات اقلیمی، فصلی و پوشش گیاهی بر بروی چگالی نسبی و هدایت هیدرولیکی پرداختند و در دو لایه سطحی و زیرسطحی این اثرات را مطالعه کردند. در پنج نوع کاربری زمین کشاورزی، مرتع، باغ‌ها، جنگل‌ها و بوته‌زارها نتایج بدست آمد. در چگالی ظاهری مناطق کشاورزی و بوته‌زارها به مراتب اعداد بالاتری را ثبت کردند اما در لگاریتم هدایت هیدرولیکی اعداد تفاوت فاحشی با هم نداشتند و فقط مقداری در مرتع عدد بزرگ‌تری ثبت شد.

به عنوان نمونه گوشه‌ای از این نتایج در شکل ۸ آورده شده است. این نتایج مختص به یک منطقه است و به طور قطعی نمی‌توان گفت که نوع اراضی در هدایت هیدرولیکی بی‌تأثیر است. در مطالعه‌ای به منظور بررسی تغییر کاربری اراضی در جنگل‌های چین، تغییر پوشش گیاهی بومی به جنگل‌های مخلوط، جنگل بامبو و مزارع چای، پارامترهای اساسی مرتبط با فیزیک و شیمی خاک از جمله، هدایت هیدرولیکی بررسی شدند. در عمق ۰ تا ۱۰ سانتی‌متر تفاوتی وجود نداشت اما در ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متری، خاک جنگل‌های بومی هدایت به مراتب بیش‌تر از جنگل‌های مدیریت شده بود و به این نتیجه رسیدند که پوشش گیاهی عامل کلیدی تأثیر گذار بر خاک از طریق تغییر تخلخل و خاکدانه‌های پایدار خاک است (Benjamin et al., 2019). در شکل ۷ تأثیر سه نوع کاربری زمین از لحاظ نوع کشت بر پارامترهای فیزیکی خاک بررسی کردند. چمنزارها بیش‌ترین مقدار هدایت هیدرولیکی را در همه اعماق خاک داشت و این اشاره مستقیم به دست نخورده بودن خاک دارد. در این شکل در قسمت درشت دانه خاک می‌توان تأثیرات مستقیم ریشه و بر شکستن خاکدانه‌های خاک مشاهده کرد.



شکل ۷: تأثیر نوع کشت بر کربن آلی خاک، ذرات درشت خاک، چگالی ظاهری، ذخیره آب و هیدرولیک اشباع (k_{sat}) برای خاک Weld silt loam. WCM نشان‌دهنده قطعات چرخشی گندم، ذرت و ارزن است، WF نشان‌دهنده قطعات چرخشی گندم-بایر است و Grass نشان‌دهنده قطعات دائمی چمن است (Benjamin et al., 2008)

اثر ریشه‌ها بر هدایت هیدرولیکی به شکل‌شناسی و مورفولوژی ریشه وابسته است. تحقیقات نشان داده‌اند که ریشه‌ها در بازه معینی از اندازه (۰.۵ تا ۲ میلی‌متر) تأثیرات معناداری بر خصوصیات هیدرولیکی خاک اعمال می‌نمایند، در حالی که ریشه‌هایی با اندازه بسیار ریز یا درشت‌تر ممکن است این خصوصیات را به درجه کمتری تحت تأثیر بگذارند (Cui et al., 2019). ایجاد خلل و فرج درشت به هدایت هیدرولیکی بسیار زیاد منجر می‌گردد. این منافع به طور کارآمد جریان ترجیحی (Preferential Flow) را فعال نموده و در نتیجه K_s را به طور قابل توجهی ارتقا می‌بخشند (Jiang et al., 2018; Scanlan, 2009). در سوی دیگر، ریشه‌های رشته‌ای و کم‌عمق که از ویژگی‌های غلات به شمار می‌روند، اثر بیشتری بر بهبود همگنی توزیع آب از راه افزایش تخلخل مویرگی (Microporosity) در بخش‌های فوقانی خاک اعمال می‌کنند.



شکل ۸: در قسمت بالا نتایج چگالی ظاهری و در پایین لگاریتم هدایت هیدرولیکی بر حسب میلیمتر بر دقیقه نشان داده شده است. میله‌ها نشان دهند انحراف معیار نتایج و بدنه نشان دهنده میانگین و خط وسط، میانه را نشان می‌دهد. عمق نمونه گیری ۲۰ سانتی متری سطح خاک است (Zhao et al., 2021).

مراحل فیزیولوژیکی ریشه (توسعه در برابر پوسیدگی)

اثر ریشه بر K_s دارای ماهیتی دینامیک و متکی به فازهای گوناگون دوره حیات گیاهی است. برای مثال (Scanlan, 2009) در تحقیقی بر گندم، دریافت که طی مرحله رشد پویای گیاه (هفته ۷)، K_s به طور موقتی تا ۰/۴۴ برابر سطح اولیه خود کاهش یافت؛ این کاهش احتمالاً از انسداد مکانیکی حفره‌ها توسط ریشه‌های پویا و درگیر در جذب آب ناشی می‌شود. با این وجود، با انتقال گیاه به مرحله تولیدمثلی و شروع مراحل تجزیه ریشه (هفته ۹)، K_s به ۱/۳۲ برابر مقدار اولیه ارتقا یافت. این تحول فازی را می‌توان با ایده نسبت اندازه ریشه به اندازه حفره (β) توضیح داد: وقتی β زیاد است (دلالت بر حضور ریشه تازه و سالم)، ریشه به عنوان سدی در راه جریان عمل می‌نماید؛ اما هنگامی که β کم می‌گردد (پس از فساد ریشه)، فضای حلقه‌مانند شکل گرفته پیرامون ریشه به عنوان مجراهای جریان با رسانایی بالا عمل می‌کند. سیستم‌های ریشه‌ای درشت می‌توانند تا ۳۰ درصد بر روی مقدار خلل و فرج درشت خاک تأثیر گذار باشند. ارتباط خلل و فرج و تشکیل خاکدانه، دو پارامتر مؤثر در عوامل فیزیکی خاک هستند (Bodner et al., 2014).

جدول ۲: تغییرات در سیستم ریشه و هدایت هیدرولیکی اشباع‌شده در طول دوره آزمایش و مراحل مختلف رشد (Scanlan, 2009).

پارامتر	هفته ۳	هفته ۵	هفته ۷	هفته ۹
چگالی طول ریشه (cm/cm^3)	۲/۰۳	۹/۳۷	۱۱/۷	۱۳/۷۳
جرم ریشه (g/ستون)	۰/۴۲	۲/۹۴	۳/۹۶	۴/۶۴
حجم ریشه ($\text{cm}^3/\text{ستون}$)	۲/۵۳	۲۲/۳۶	۳۹/۶۷	۴۷/۳۱
چگالی بافت ریشه (g/cm^3)	۰/۱۷	۰/۱۳	۰/۱	۰/۱
شعاع متوسط ریشه (cm)	۰/۰۱۵	۰/۰۱۵	۰/۰۱۷	۰/۰۱۶
طول ویژه ریشه (cm/g)	۵۴۰۵۶۴	۵۴۴۱۴۳	۳۷۶۷۷۰	۵۰۱۶۹۳
هدایت هیدرولیکی نسبی K_s	۱	۲/۶۵	۴/۵۹	۳/۲
توصیف مرحله رشد	جوانه‌زنی تا پنجه‌زنی	رشد ساقه تا غلاف‌سازی	ظهور کامل خوشه	رسیدن دانه

عملکرد زیستی و بیولوژی

عملکرد ارگانسیم‌های ساکن خاک، به ویژه کرم‌های زمینی، عنصر کلیدی دیگری در ارتقای رسانایی هیدرولیکی اشباع (K_s) و آسان‌سازی جریان ترجیحی درون خاک محسوب می‌شود. این جانداران با حفر کانال‌ها و تولید حفره‌های وسیع در خاک، مجراهای با رسانایی بالا برای ورود آب فراهم می‌آورند. مطالعات بیانگر آن است که رویکردهای مدیریتی زراعی که از پوشش گیاهی پایدار برخوردار بوده و سطوح بالای مواد ارگانیک را دارا هستند، شرایط مطلوبی را برای ترغیب این عملکرد زیستی و در پی آن، بهبود سازمان هیدرولیکی خاک ایجاد می‌نمایند. همان‌گونه که ارزیابی جامع در مورد این موضوع بیانگر آن است، رسانایی هیدرولیکی اشباع (K_s) نه به عنوان تابعی از یک عنصر واحد، بلکه تحت سلطه یک سیستم درهم‌بافته و پیچیده از عوامل فیزیکی، شیمیایی و زیستی قرار دارد. از این رو، شناخت دقیق چگونگی برهم‌کنش این متغیرها برای تخمین رفتار هیدرولیکی خاک و دستیابی به راهبردهای مدیریتی کارآمد، امری ضروری به شمار می‌رود. برای نمونه، پیوند میان رویکردهای خاک‌ورزی و ویژگی‌های شیمیایی خاک به طور قابل توجهی برجسته است. یک الگوی مبتنی بر خاک‌ورزی سنتی (CT) که ذاتاً ساختار خاک را مختل نموده و درجه استحکام آن را تقلیل می‌دهد، خاک را نسبت به آثار زیان‌بار درصد سدیم قابل مبادله (ESP) حتی در مقادیر نسبتاً اندک، به شدت حساس می‌سازد. این حساسیت ناشی از کاهش دوام خاکدانه‌ها و افزایش جداسازی اجزای رس در حضور سدیم می‌باشد. در نقطه مقابل، یک الگوی فاقد خاک‌ورزی (NT) که با پوشش گیاهی پایدار و سطوح بالای محتوای ارگانیک همراه است، با نگهداری و تقویت ساختار خاک و ارتقای دوام خاکدانه‌ها، درجه بالاتری از مقاومت طبیعی در برابر فرآیند تجزیه ناشی از سدیم بروز می‌دهد.

علاوه بر این، برهم‌کنش میان مورفولوژی ریشه و ترکیب بافت خاک اثر معناداری بر رفتار هیدرولیکی اعمال می‌نماید. به طور ویژه، نقش ریشه‌ها در تولید مجراهای ماکرو (به خصوص پس از فرآیند تجزیه) در خاک‌های با بافت ریز (مانند رس‌ها و سیلت‌ها) به مراتب برجسته‌تر و از منظر نسبی، گسترده‌تر ارزیابی می‌گردد. دلیل این موضوع آن است که K_s اولیه در این خاک‌ها به طور ذاتی بسیار پایین می‌باشد؛ بنابراین، تشکیل حتی تعداد اندکی از کانال‌های جریان ترجیحی توسط ریشه می‌تواند افزایش چندصد درصدی در هدایت هیدرولیکی به دنبال داشته باشد (Scanlan, 2009). Whalley و همکاران در ۲۰۰۵ بیان کردند که توسعه ریشه می‌تواند باعث پیوند بین منافذ خاک شود. با این حال پر پیچ و خم بودن سیستم ریشه موجب می‌شود که این پارامتر در برازش هدایت هیدرولیکی نقش زیادی نداشته باشد (Cattl & Vervoort, 2003). درک تعامل میان پارامترها مستلزم توجه به این نکته است که شبکه‌های کنترلی ماهیتی ایستا ندارند، بلکه پویا و متغیر در گذر زمان‌اند. تأثیر هر نوع مداخله مدیریتی، چه تغییرات فیزیکی حاصل از عملیات خاک‌ورزی و چه پیامدهای زیستی ناشی از گسترش سیستم ریشه، به‌طور قابل توجهی در طول زمان دچار دگرگونی می‌شود. این پویایی زمانی می‌تواند موجب بروز تفاوت‌های چشمگیر میان پیامدهای کوتاه‌مدت و بلندمدت گردد؛ برای نمونه، ممکن است تأثیرات اولیه یک اقدام مدیریتی سودمند به نظر برسد، اما در بلندمدت آثار منفی آن نمایان شود (یا برعکس). از این رو، انجام تحلیل‌های بلندمدت برای ارزیابی دقیق رفتار و کارکرد هیدرولیکی خاک ضرورت دارد.

نتیجه‌گیری

هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) به‌عنوان پارامتری پویا، با فعالیت‌های انسانی و طبیعی تغییراتی در آن ایجاد می‌شود که حاصل ارتباط میان عوامل فیزیکی، شیمیایی و زیستی در مقیاس مکانی و زمانی است. تأثیر متقابل میان این ۳ عامل نشان‌دهنده این است که برای مدیریت درست هدایت هیدرولیکی خاک نمی‌توان به یک راهکار ساده ارايه کرد و می‌بایست رویکردی جامع داشته باشیم. تعیین هدایت هیدرولیکی مانند روابط خطی نیست و به صورت غیرخطی است و در نتیجه اثرات آن بر محیط نیز پیچیده خواهد بود.

مدیریت حفاظتی

نظام‌های مدیریتی حفاظتی نظیر کشت بدون خاک‌ورزی، بهره‌گیری هدفمند از نهاده‌های آلی، و حفظ پوشش دائمی سطح خاک، نقش مؤثری در افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) دارند. این اثر نه تنها از طریق بهبود مستقیم ویژگی‌های فیزیکی خاک، از جمله ساختمان خاک، میزان ماده آلی، و فعالیت‌های زیستی حاصل می‌شود، بلکه با تقویت پایداری ساختار خاکدانه‌ها، تاب‌آوری خاک را در برابر تنش‌های شیمیایی زیان‌بار همچون شوری و سدیم تبادلی به طور چشمگیری ارتقا می‌دهد.

چشم‌اندازهای آینده

- تحقیقات آتی باید بر طراحی و توسعه مدل‌های پیش‌بینی سب‌بعدی متمرکز شوند که بتوانند تعاملات زمان‌مند و مکان‌مند میان عوامل زیستی نظیر رشد و گسترش سامانه ریشه و فعالیت کرم‌های خاکی و ویژگی‌های فیزیکی خاک از جمله تخلخل و ساختمان خاک را در مقیاس مزرعه‌ای شبیه‌سازی کنند.
- همچنین، ضرورت دارد شاخص‌های نوینی طراحی شوند که تا بتوانند ثبات هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) را در برابر تنش‌ها و شوک‌های مدیریتی یا اقلیمی، مانند بارندگی‌های شدید، به‌صورت کمی و پویا ارزیابی کنند؛ شاخص‌هایی فراتر از سنجش‌های لحظه‌ای و ایستا که در حال حاضر متداول‌اند.

اهمیت پایش شیمیایی

بررسی مرتب کیفیت آب آبیاری شامل پارامترهایی نظیر شوری، نسبت جذب سدیم (SAR) و pH و مدیریت فعال این متغیرها برای پیشگیری از تخریب تدریجی ساختمان خاک در بلندمدت امری ضروری است. مقدار بالا پارامترهای شیمیایی می‌توانند پایداری فیزیکی حاصل از مدیریت درست را کاهش دهند و از اثرات مثبت آن را در گذر زمان بکاهند.

مهندسی زیستی ریشه

انتخاب گونه‌های گیاهی با سیستم ریشه‌ای مناسب، به‌ویژه گیاهان با ریشه عمیق، می‌تواند به‌عنوان رویکرد زیستی مؤثر در بهبود مقدار نفوذپذیری آب در خاک‌های متراکم و کامپکت مورد استفاده قرار گیرد. این سیستم ریشه‌ای می‌تواند منافذ و کانال‌هایی با هدایت هیدرولیکی بالا درون خاک ایجاد کند و به انتقال آب در درون خاک سرعت ببخشد. خلل و فرج درشت خاک در نزدیک سطح خاک هستند و در این بخش بیش‌ترین تراکم ریشه را شاهد هستیم. تحلیل تنوع سیستم ریشه گیاه امری بسیار مهم برای مدل‌سازی ارتباط ریشه با هدایت هیدرولیکی است زیرا بسیاری از گیاهان ریشه نازک با تراکم زیاد دارند و نوع دیگر فقط ریشه‌های ضخیم دارند و به راحتی نمی‌توان تشخیص داد که کدام مورد بیش‌ترین تأثیر را می‌گذارند (Jin et al., 2013).

چشم‌اندازهای آینده

برای شناخت بهتر از مدیریت پویای هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s)، لازم است، بررسی‌هایی در موارد زیر انجام شود: توسعه مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر فرآیند؛ ضروری است مدل‌های شبیه‌سازی پیشرفته‌ای طراحی و به‌کار گرفته شوند که بتوانند تعاملات پیچیده و چندبعدی میان عوامل زیستی، شیمیایی و فیزیکی را در بستر شرایط محیطی متغیر و پویا پیش‌بینی کنند.

استانداردسازی روش‌های اندازه‌گیری

نیاز به یکپارچه‌سازی و استانداردسازی روش‌های سنجش K_s به‌ویژه در زمینه کمی‌سازی دقیق و قابل‌اعتماد جریان‌های ترجیحی وجود دارد تا مقایسه و تحلیل داده‌ها در مطالعات مختلف امکان‌پذیر و معتبر گردد.

مطالعات بلندمدت

اجرای پژوهش‌های میدانی بلندمدت که به‌صورت هم‌زمان متغیرهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی را در شرایط واقعی مزرعه مورد بررسی قرار دهند باعث شناسایی بهتر اثرات تجمعی منفی می‌شود.

کمی‌سازی اثرات هم‌افزایی

ضروری است پژوهش‌هایی بر کمی‌سازی دقیق تعاملات و هم‌افزایی میان عوامل مؤثر صورت بگیرد. به عنوان مثال، بررسی میزان هم‌افزایی میان افزودن ماده آلی و اثرات سیستم ریشه در بهبود K_s تحت شرایط تنش شوری می‌تواند دیدگاه‌های جدیدی برای مدیریت بهتر خاک و آب فراهم کرد. همچنین همه اثرات مورد بحث با هم بررسی می‌شوند. همچنین، ضرورت دارد شاخص‌های نوینی طراحی شوند که بتوانند پایداری هدایت هیدرولیکی را در برابر تنش‌های انسانی و اقلیمی، مانند بارندگی‌های شدید، به‌صورت درست ارزیابی کنند.

REFERENCE

Alakukku, L. (1996b). Persistence of soil compaction due to high axle load traffic. 2. Long-term effects on the properties of fine-textured and organic soils. Soil & Tillage Research, 37(4), 223–238.

- Assouline, S., & Narkis, K. (2011). Effects of long-term irrigation with treated wastewater on the hydraulic properties of a clayey soil. *Water Resources Research*, 47(8), W08530.
- Benjamin, J. G., Mikha, M. M., & Vigil, M. F. (2008). Organic carbon effects on soil physical and hydraulic properties in a semiarid climate. *Soil Science Society of America Journal*, 72(5), 1357–1362.
- Bodner, G., Leitner, D., & Kaul, H. P. (2014). Coarse and fine root plants affect pore size distributions differently. *Plant and Soil*, 380, 133–151.
- Brandt, S. A. (1992). Zero vs conventional tillage and their effects on crop yield and soil moisture. *Canadian Journal of Plant Science*, 72(3), 679–688.
- Chang, C., & Lindwall, C. W. (1989). Effect of long-term minimum tillage practices on some physical properties of a chernozemic clay loam. *Canadian Journal of Soil Science*, 69(3), 443–449.
- Chang, C., & Lindwall, C. W. (1990). Comparison of the effect of long term tillage and crop rotation on physical properties of a soil. *Canadian Agricultural Engineering*, 32(1), 53–55.
- Chang, C., & Lindwall, C. W. (1992). Effects of tillage and crop rotation on physical properties of a loam soil. *Soil & Tillage Research*, 22(3–4), 383–389.
- Chen, Y., Banin, A., & Borochoy, A. (1983). Effect of potassium on soil structure in relation to hydraulic conductivity. *Geoderma*, 30(1–4), 135–147.
- Cui, Z., Wu, G.-L., Huang, Z., & Liu, Y. (2019). Fine roots determine soil infiltration potential more than soil water content in semi-arid grassland soils. *Journal of Hydrology*, 578, 124023 .
- Franzluebbers, A. J., Hons, F. M., & Zuberer, D. A. (1995). Soil organic carbon, microbial biomass, and mineralizable carbon and nitrogen in sorghum. *Soil Science Society of America Journal*, 59, 460–466 .
- Hammel, J. E. (1989). Long-term tillage and crop rotation effects on bulk density and soil impedance in northern Idaho. *Soil Science Society of America Journal*, 53(5), 1515–1519.
- Hao, M., Zhang, J., Meng, M. (2019). Impacts of changes in vegetation on saturated hydraulic conductivity of soil in subtropical forests. *Scientific Reports*, 9, 8372 .
- Hu, W., Shao, M. A., Wang, Q. J., & She, D. L. (2013). Effects of measurement method, scale, and landscape features on variability of saturated hydraulic conductivity. *Journal of Hydrology*.
- Jiang, X. J., Liu, W., Chen, C., Liu, J., Yuan, Z.-Q., Jin, B., & Yu, X. (2018). Effects of three morphometric features of roots on soil water flow behavior in three sites in China. *Geoderma*, 320, 161–171.
- Jin, K., Shen, J., Ashton, R. W., Dodd, I. C., Parry, M. A., & Whalley, W. R. (2013). How do roots elongate in a structured soil? *Journal of Experimental Botany*, 64, 4761–4777.
- Liebig, M. A., Jones, A. J., Mielke, L. N., & Doran, J. W. (1993). Controlled wheel traffic effects on soil properties in ridge tillage. *Soil Science Society of America Journal*, 57(4), 1061–1066.
- Mahboubi, A. A., Lal, R., & Faussey, N. R. (1993). 28 years of tillage effects on two soils in Ohio. *Soil Science Society of America Journal*, 57(2), 506–512.
- Mudgal, A., Anderson, S. H., Baffaut, C., Kitchen, N. R., & Sadler, E. J. (2010). Effects of long-term soil and crop management on soil hydraulic properties for claypan soils. *Journal of Soil and Water Conservation*, 65(6), 393–403.
- Rezaie, H., Neishabouri, M. R., & Sepaskhah, A. R. (2004). Determination of hydraulic conductivity and diffusivity for unsaturated soils by pressure plates and selection of an appropriate prediction model. *Journal of Water and Soil Science*, 8(3), 15–31.(in persian)
- Scanlan, C. A. (2009). Processes and effects of root-induced changes to soil hydraulic properties [Doctoral dissertation, The University of Western Australia].
- Shi, X., Qin, T., Yan, D., Tian, F., & Wang, H. (2021). A meta-analysis on effects of root development on soil hydraulic properties. *Geoderma*, 403, 115363.
- Strudley, M. W., Green, T. R., & Ascough, J. C. II (2008). Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. *Soil & Tillage Research*, 99(2), 4–48.
- Suarez, D. L., Rhoades, J. D., Lavado, R., & Grieve, C. M. (1984). Effect of pH on saturated hydraulic conductivity and soil dispersion. *Soil Science Society of America Journal*, 48(1), 50–55.
- Taiwo, A., Kramer, I., Levy, G. J., & Mau, Y. (2022). Salinity and sodicity can cause hysteresis in soil hydraulic conductivity. *Geoderma*, 413, 115765 .
- Takele, B., & Si, B. (2005). Scaling relationships between saturated hydraulic conductivity and soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal*, 69 .
- Thangasamy, A., Singh, D., Dwivedi, B. S., Chakraborty, D., Tomar, R. K., & Meena, M. C. (2017). Soil organic carbon, hydraulic properties and yield of maize and wheat under long-term fertilization in an Inceptisol. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 65(2), 189–198.
- Usonicz, B., & Lipiec, J. (2021). Spatial variability of saturated hydraulic conductivity and its links with other soil properties at the regional scale. *Scientific Reports*, 11(1), 8293 .



- Van Genuchten, M. Th., Leij, F. J., & Yates, S. R. (1991). The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. R. S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada.
- Vervoort, R. W., & Cattle, S. R. (2003). Linking hydraulic conductivity and tortuosity parameters to pore space geometry and pore size distribution. *Journal of Hydrology*, 272, 36–49.
- Whalley, W. R., Riseley, B., Leeds-Harrison, P. B., Bird, N. R. A., Leech, P. K., & Adderley, W. P. (2005). Structural differences between bulk and rhizosphere soil. *European Journal of Soil Science*, 56, 353–360.
- Zhang, X., Wendroth, O., Matocha, C., Zhu, J., & Reyes, J. (2020). Assessing field-scale variability of soil hydraulic conductivity at and near saturation. *University of Kentucky Faculty, Staff, and Supported Research*, 36.
- Zhao, Y., Wang, Y., & Zhang, X. (2021). Spatial and temporal variation in soil bulk density and saturated hydraulic conductivity and its influencing factors along a 500 km transect. *CATENA*, 207, 105592.
- Zhu, Y., Bennett, J. M., & Marchuk, A. (2019). Reduction of hydraulic conductivity and loss of organic carbon in non-dispersive soils of different clay mineralogy is related to magnesium-induced disaggregation. *Geoderma*, 349, 1–10.