

## برآورد هدایت هیدرولیکی با استفاده از چند ویژگی زودیاب خاک

سمیرا مصری، شجاع قربانی دشتکی<sup>1</sup>، حسین شیرانی، ابوالقاسم کامکار روحانی،

حمیدرضا متقیان و حسینعلی بهرامی

دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد؛ [dorsa\\_mesry@yahoo.com](mailto:dorsa_mesry@yahoo.com)

استاد گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد؛ [shoja2002@yahoo.com](mailto:shoja2002@yahoo.com)

استادگروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه رفسنجان؛ [shirani379@yahoo.com](mailto:shirani379@yahoo.com)

دانشیار دانشکده مهندسی معدن، ژئوفیزیک و نفت، دانشگاه صنعتی شاهرود؛ [kamkarr@yahoo.com](mailto:kamkarr@yahoo.com)

استادیار گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد؛ [motaghian.h@yahoo.com](mailto:motaghian.h@yahoo.com)

استاد دانشگاه تربیت مدرس؛ [bahramih@modares.ac.ir](mailto:bahramih@modares.ac.ir)

دریافت: 98/12/3 و پذیرش: 99/4/25

### چکیده

هدایت هیدرولیکی اشباع خاک یکی از مهمترین خصوصیات هیدرولیکی خاک است که بر حرکت آب در خاک مؤثر می‌باشد. هدف از این پژوهش برآورد مهم‌ترین پارامترها در پیش‌بینی و مدل‌سازی هدایت هیدرولیکی اشباع به وسیله خصوصیات زودیافت خاک، و با استفاده از درخت تصمیم‌گیری و تخمین‌گر خطا Cross Validation و Re substitution بود. در این پژوهش، 72 نمونه خاک از شش بافت مختلف از روستای مرغملک و شهرستان شهرکرد گردآوری شد. خصوصیات زودیافت خاک در چهار سناریو (سناریو اول: EC، pH، درصد شن و رس، ماده آلی، کربنات کلسیم، میانگین وزنی قطر خاکدانه خشک و مرطوب، جرم مخصوص ظاهری و رطوبت اشباع، سناریو دوم: کربنات کلسیم، ماده آلی، درصد شن و رس، جرم مخصوص ظاهری، درصد سنگریزه، مقاومت الکتریکی، ثابت دی‌الکتریک، مقاومت نفوذ به ریشه، سناریو سوم: EC، pH، میانگین هندسی قطر ذرات، انحراف معیار هندسی قطر ذرات، ماده آلی، کربنات کلسیم، میانگین وزنی قطر خاکدانه خشک و مرطوب، جرم مخصوص ظاهری و رطوبت اشباع و سناریو چهارم: کربنات کلسیم، ماده آلی، میانگین هندسی قطر ذرات، انحراف معیار هندسی قطر ذرات، جرم مخصوص ظاهری، درصد سنگریزه، مقاومت الکتریکی، ثابت دی‌الکتریک، مقاومت نفوذ به ریشه) به نرم‌افزار معرفی شدند. هدایت هیدرولیکی اشباع نمونه‌ها با استفاده از تک رینگ اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل نشان داد که رطوبت و پس از آن ویژگی‌های ساختمانی مانند انحراف معیار هندسی قطر ذرات در سناریو اول، ماده آلی، جرم مخصوص ظاهری در سناریو دوم، جرم مخصوص ظاهری و پایداری خاکدانه در سناریو سوم و ماده آلی و جرم مخصوص ظاهری در سناریو چهارم مهم‌ترین پارامترهای اثرگذار بر هدایت هیدرولیکی اشباع می‌باشند. همبستگی میان داده‌های پیش‌بینی‌شده با درخت تصمیم‌گیری و داده‌های اندازه‌گیری شده در سناریو دوم و چهارم 0/83 و 0/82 و در سناریو اول و سوم 0/79 به دست آمد. با توجه به میزان خطا و RMSE% هر چهار سناریو در مدل‌سازی موفق بوده‌اند. اما RMSE% در سناریو دوم و چهارم کمتر و ضریب همبستگی بیشتر از دو سناریوی دیگر بوده است. مقدار RMSE نیز در چهار سناریو به ترتیب 0/79، 0/83، 0/79 و 0/82 بود.

واژه‌های کلیدی: پایداری خاکدانه، رطوبت اشباع، نفوذ آب به خاک، درخت تصمیم‌گیری، تخمین‌گر خطا

<sup>1</sup> نویسنده مسئول، آدرس: شهرکرد، دانشگاه شهرکرد - دانشکده کشاورزی، گروه آب و خاک

## مقدمه

با استفاده از آنها از ویژگی‌های زودیافت خاک، ویژگی‌های دیریافت خاک را تخمین زد (کوآ و هانت، 1996). بنابراین میزان علاقه به استفاده از توابع انتقالی برای تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک روزبه‌روز در حال افزایش است (کاسبی 1984 و لیچ و همکاران، 2002)

از جمله مدل‌های برآوردکننده توابع انتقالی شامل مدل‌های رگرسیونی (راولز و همکاران، 1991) و شبکه‌های عصبی مصنوعی (میناسی و همکاران 2004) می‌باشند. پژوهشگران تاکنون توابع انتقالی مختلفی برای تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع از روی خصوصیات زودیافت خاک ایجاد کرده‌اند. بعضی از این توابع نسبت به سایرین برآورد بهتری داشته در حالیکه برخی مناسب نبودند، ترابی (1383) با مقایسه توابع انتقالی با روش‌های مستقیم نشان داد که مدل جبرو (1992) با ورودی‌های سیلت، رس و جرم مخصوص ظاهری به دلیل عدم در نظر گرفتن سایر عوامل مؤثر بر هدایت هیدرولیکی اشباع مانند شوری خاک، مدل‌های مناسبی نیستند. از آنجا که برای پیش‌بینی پارامترهای هیدرولیکی در خاک، چندین متغیر ورودی و خروجی مؤثرند، تحلیل آماری این نوع مسائل مستلزم ارائه تعدادی روابط ریاضی است که اغلب برای استفاده و تفسیر دشوار است. اما امروزه با توسعه سریع فناوری‌های پردازش رایانه‌ای و ایجاد نرم‌افزارهای مربوطه، از مزایای فناوری هوش مصنوعی مانند شبکه‌های عصبی برای مسائل مربوط به مدل‌سازی سیستم‌ها و فرآیندها استفاده می‌شود (چایجان، 1388) و وستن و همکاران و سابراج و همکاران با استفاده از پارامترهایی همچون تخلخل مؤثر، فراوانی نسبی ذرات خاک، ماده آلی و چگالی ظاهری، توابعی برای برآورد هدایت آبی اشباع خاک ارائه کردند (سابراج و همکاران 2001 و وستن و همکاران، 2001).

شاپ و همکاران (2001) از نرم‌افزار روزتا که برپایه شبکه‌های عصبی است و از مدل معلم- ونگنوختن بهره گرفتند، و به پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع پرداختند نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش پارامترهای ورودی به مدل، عملکرد توابع انتقالی در پیش‌بینی ks قابل قبول بود. ویژگی مشترک توابع انتقالی این است که همه آنها بر اساس روش‌های پارامتریک هستند، یعنی معادله‌هایی از پیش تعیین‌شده با تعدادی پارامتر معین هستند. از معایب روش‌های پارامتریک می‌توان به این موارد اشاره نمود: تشخیص معادله صحیح همیشه آسان نیست، در صورتیکه داده جدید فراهم شود

خصوصیات فیزیکی خاک نقش تعیین‌کننده‌ای در درک و حل بسیاری از مشکلات زیست‌محیطی دارند. یکی از مهمترین این خصوصیات هدایت هیدرولیکی اشباع است که نشان‌دهنده توانایی خاک در انتقال آب تحت شرایط اشباع می‌باشد. هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (ks) یک پارامتر مهم در تعیین عملیات آبیاری، طراحی زهکش‌ها، رواناب، تغذیه آب‌های زیرزمینی، شبیه‌سازی آبشویی و سایر فرآیندهای هیدرولوژیکی و کشاورزی است (جابرو، 1992). هدایت هیدرولیکی اشباع تغییرات مکانی و زمانی بالایی دارد و در بین پارامترهای فیزیکی خاک دارای بیشترین ضریب تغییرات است و نقش مهمی در نفوذ آب و ایجاد رواناب سطحی دارد و برای اندازه‌گیری آن، روش‌های مختلف آزمایشگاهی و مزرعه‌ای استفاده می‌شود (نصرتی و همکاران، 2012). در صورتی که اندازه یا حجم نمونه برداشت‌شده افزایش یابد، نسبت به زمانی که حجم نمونه برداشت‌شده کمتر باشد، تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع و تغییرات مکانی آن واقعی‌تر صورت می‌گیرد اما هزینه‌های بالای کارگری و مشکلات بیشتر نمونه‌برداری را در پی دارد (مالانت و همکاران، 1997). با وجود تلاش‌های فراوانی که برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع در شرایط مزرعه انجام می‌گیرد، هم‌چنان عواملی هستند که باعث ایجاد خطا در اندازه‌گیری این ویژگی می‌شوند از جمله این عوامل عبارتند از: حبس هوا در منافذ خاک هنگامی که نمونه خاک اشباع می‌شود، عدم اشباع کامل نمونه خاک هنگام استفاده از روش‌های اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع بالای سطح ایستابی و متفاوت بودن کیفیت آب مورد استفاده برای اشباع خاک با آب زیرزمینی همان محل که باعث تفاوت نتایج روش‌های اندازه‌گیری بین روش‌های بالای سطح ایستابی و زیر سطح ایستابی می‌شود (مهدیان، 2005).

هدایت هیدرولیکی اشباع خاک که از مهمترین ویژگی‌های فیزیکی خاک می‌باشد، در طراحی فنی و اقتصادی پژوهش‌های زهکشی نقش به‌سزائی دارد. اندازه‌گیری این ویژگی‌ها به دلیل نیاز به صرف هزینه و زمان زیاد و تغییرپذیری مکانی و زمانی فراوان آن‌ها، اغلب با دشواری‌هایی همراه است لذا روش‌های غیرمستقیم به‌عنوان راهکاری برای حل نسبی این مشکلات ارائه شده‌اند. در روش‌های غیرمستقیم، از خصوصیات زودیافت خاک برای برآورد خصوصیات دیریافت آن استفاده می‌شود. استفاده از توابع انتقالی یکی از روش‌های غیرمستقیم می‌باشد که می‌توان

50° تا 30' 34" 50 شهرکرد قرار دارد. بارش متوسط سالیانه 400 میلی‌متر است که بیشتر در زمستان و بهار اتفاق می‌افتد. دمای متوسط سالانه 23 درجه سانتی‌گراد با میانگین حداقل 3/8 و میانگین حداکثر 30/7 درجه سانتی‌گراد است. شهرستان شهرکرد نیز دارای اقلیم نیمه-مرطوب معتدل با تابستان‌های معتدل و زمستان‌های بسیار سرد است. میانگین دمای هوا در شهرکرد 11/5 درجه سانتی‌گراد است.

#### روش نمونه‌برداری

ابتدا نقشه توپوگرافی با مقیاس 1:25000 تهیه - شد. نقاط نمونه‌برداری به طور تصادفی بر روی محدوده مطالعاتی تعیین شدند به طوری که نقاط در تمام منطقه پخش بودند. پس از تعیین مختصات جغرافیایی نقاط، موقعیت نقاط توسط دستگاه GPS در صحرا مشخص شد. سپس 72 نمونه خاک از عمق صفر تا 20 سانتی‌متر با استفاده از بیلچه برداشته شده و به آزمایشگاه منتقل شد. هم‌چنین نمونه‌های دست‌نخورده نیز برای تعیین چگالی ظاهری به وسیله سیلندر با ابعاد 5×5 از سطح خاک برداشت شدند.

#### اندازه‌گیری برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و ژئوفیزیکی خاک

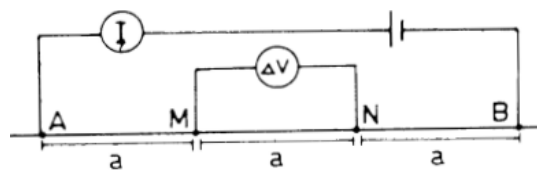
بافت خاک به روش هیدرومتری (بایکس، 1962)، اسیدیته خاک در حالت گل اشباع با استفاده از دستگاه pH متر، قابلیت هدایت الکتریکی با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی در عصاره اشباع (پیچ و همکاران، 1987)، کربن آلی با اکسیداسیون توسط دی-کرومات پتاسیم (والکلی و بلاک، 1934)، جرم مخصوص ظاهری نمونه‌ها با روش سیلندر با ابعاد معین (کلوت و دیرکسون، 1986)، آهک، به روش خشتی کردن مواد خشتی-شونده با اسید کلریدریک و تیتراسیون اسید اضافی با سود، میانگین وزنی (Mean Weight Diameter) با استفاده از الک خشک و مرطوب (کمپر و روزن، 1986) و رطوبت اشباع خاک به روش تهیه گل اشباع در آزمایشگاه و سپس خشک کردن در آن 105 درجه به مدت 24 ساعت تعیین شدند.

به منظور برآورد مقاومت الکتریکی از آرایش ونر استفاده شد (ونر، 1916). در این آرایش چهار الکترود A B N M در روی زمین در طول یک خط راست طوری قرار می‌گیرند که  $AM = MN = NB = a$  هستند به منظور برآورد مقاومت الکتریکی خاک از سطح تا عمق بیست سانتی‌متری الکترودها به فاصله  $a = 78$  سانتی‌متری از هم قرار گرفتند.

معادلات باید بازسازی شوند و کاربران قادر نخواهند بود که به سادگی هر گونه داده اضافی را برای بهبود عملکرد در منطقه خود و برای خصوصیات ویژه خاک خود استفاده کنند. استفاده از روش‌های ناپارامتریک یک راه‌حل جایگزین است. یعنی روش‌هایی که فرضیاتی راجع به روابط متغیرها ایجاد نمی‌کنند و از توابع از پیش تعیین-شده‌ای برای پیش‌بینی متغیر موردنظر استفاده نمی‌کنند. از روش‌های ناپارامتریک که از الگوریتم‌های ناپارامتریک استفاده می‌کنند می‌توان به روش درخت تصمیم و k نزدیک‌ترین همسایه (k-NN) اشاره نمود. یکی از موارد استفاده از روش‌های ناپارامتریک پیش‌بینی خصوصیات هیدرولیکی خاک می‌باشد، خاشعی‌سیوکی و همکاران (2015) هدایت هیدرولیکی اشباع خاک را با استفاده از داده‌های زودیافت خاک NN-k و سیستم‌های شبکه عصبی مصنوعی برآورد نموده و نشان دادند که هر دو مدل دارای توانایی خوبی در تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع هستند و NN-k در مقایسه با شبکه عصبی مصنوعی دارای توانایی بالاتری در تخمین هدایت هیدرولیکی به-ازای پارامترهای ورودی کمتر می‌باشد. مونکادا و همکاران (2014) مدل‌های درخت تصمیم را برای ارزیابی کیفیت خاک و تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع در دو خاک گرمسیری و معتدل استفاده کردند. آنها از خصوصیات مورفولوژیکی خاک علاوه بر خصوصیات شیمیایی و فیزیکی استفاده و مشاهده کردند که کاربرد خصوصیات مورفولوژیکی در کنار سایر خصوصیات خاک تخمین  $k_s$  را بهبود می‌یابد و درختی با یک ساختار ساده‌تر ایجاد می‌شود. با توجه به اهمیت اندازه‌گیری نفوذ آب به خاک و زمان‌بر بودن اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و صحرایی، این پژوهش به منظور تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع و مهم‌ترین پارامترهای موثر بر آن، به وسیله داده‌های زود یافت آزمایشگاهی و ژئوفیزیکی، با استفاده از مدل‌سازی با درخت تصمیم‌گیری و تخمین‌گرهای خطای cross validation و Resubstitution در محیط نرم‌افزار MATLAB 2016 انجام پذیرفت.

#### مواد و روش

این پژوهش در حوزه آبخیز مرغملک، شهرستان شهرکرد، استان چهارمحال و بختیاری انجام شد. این زیرحوضه از زیر حوضه‌های زاینده‌رود با مساحت 97 کیلومترمربع (با حذف کوه‌ها) در 55 کیلومتری شمال غرب شهرستان شهرکرد (مرکز استان چهارمحال و بختیاری) قرار دارد. زیرحوضه مرغملک در محدوده جغرافیایی، عرض 32° 22' 30" و طول 22' 30"



شکل 1- نحوه قرارگیری الکترودها در آرایش الکترودی ونر

سناریو اول: pH, EC, درصد شن و رس، ماده آلی، کربنات کلسیم، میانگین وزنی قطر خاکدانه خشک و مرطوب، چگالی ظاهری و رطوبت اشباع  
سناریو دوم: کربنات کلسیم، ماده آلی، درصد شن و رس، چگالی ظاهری، درصد سنگریزه، مقاومت الکتریکی، ثابت دی الکتریک، مقاومت نفوذ به ریشه (مقاومت مکانیکی)

سناریو سوم: pH, EC, میانگین هندسی قطر ذرات، انحراف معیار هندسی قطر ذرات، ماده آلی، کربنات کلسیم، میانگین وزنی قطر خاکدانه خشک و مرطوب، چگالی ظاهری و رطوبت اشباع

سناریو چهارم: کربنات کلسیم، ماده آلی، میانگین هندسی قطر ذرات، انحراف معیار هندسی قطر ذرات، چگالی ظاهری، درصد سنگریزه، مقاومت الکتریکی، ثابت دی الکتریک، مقاومت نفوذ به ریشه (مقاومت مکانیکی)

مدل‌سازی با استفاده از درخت تصمیم‌گیری و تخمین‌گرهای خطای cross validation و Resub stitution انجام شد. در این روش مجموعه داده‌های اندازه‌گیری شده به k گروه تقسیم می‌شوند. ابتدا یک گروه کنار گذاشته شده و از سایر گروه‌ها یا داده‌ها برای طراحی و تنظیم مدل استفاده می‌شود. سپس گروه کنار گذاشته شده به عنوان داده تست به مدل اعمال شده و خطای آن ثبت می‌شود. در مرحله بعد گروه دوم به عنوان تست کنار گذاشته شده و مدل‌سازی با سایر گروه‌ها انجام می‌گردد و این روند ادامه می‌یابد تا وقتی که تمام گروه‌ها یکبار به عنوان داده‌های تست به مدل اعمال گردد در نهایت میانگین خطای گروه‌های تست به عنوان خطای مدل‌سازی در نظر گرفته می‌شود.

#### شاخص‌های ارزیابی مدل

برای سنجش دقت و اعتبار مدل از شاخص‌های ضریب تبیین ( $R^2$ ) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و درصد ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE%) استفاده شد.

در معادلات زیر N تعداد نمونه‌ها، m میانگین داده‌های واقعی، Pi مقادیر اندازه‌گیری شده و Oi مقادیر برآورد شده می‌باشد.

مقاومت الکتریکی به دست آمده از دستگاه مقاومت الکتریکی، ظاهری است که پس از ضرب در عامل آرایه (K)، مقاومت الکتریکی ویژه واقعی به دست می‌آید. معادله 1 مقاومت الکتریکی ویژه حقیقی را نشان می‌دهد.

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} K \quad (1)$$

$\rho$  مقاومت ویژه الکتریکی حقیقی (اهم  $\times$  متر)،  $\frac{\Delta V}{I}$  مقاومت الکتریکی ظاهری (اهم) به دست آمده از دستگاه و  $K = a \times 2 \times 3 / 14$  ضریب آرایه یا عامل هندسی آرایش الکترودی است و a فاصله بین الکترودها می‌باشد. ثابت دی الکتریک خاک نیز از طریق رابطه (2) به دست آمده است.

$E_{soil} = (C/V)^2$   
که در آن: E ثابت دی الکتریک خاک، C سرعت نور در فضای آزاد (خلا) و V سرعت امواج رادار زیرسطحی است که به وسیله دستگاه GPR برآورد شد.

#### روش اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع

به منظور اندازه‌گیری نفوذ آب به خاک از روش تک استوانه استفاده شد. در روش تک استوانه، استوانه‌ای به قطر داخلی 35 سانتی‌متر تا عمق 15 سانتی‌متر در خاک مستقر گردید و عمقی معادل 12 سانتی‌متر آب ریخته شد. سپس سرعت ورود آب به خاک در استوانه در شریط بار ثابت تعیین شد (باور، 1986). در این روش افت سطح آب در استوانه داخلی نسبت به زمان در یک تکرار سنجش می‌گردد و هرگاه تغییرات سطح آب در استوانه در واحد زمان در اندازه‌گیری‌های متوالی، مقادیر تقریباً یکسانی شد، به عنوان نفوذ پایه (qs) در نظر گرفته می‌شود که سرعت اندازه‌گیری شده در زمان نفوذ نهایی برابر هدایت هیدرولیکی اشباع می‌باشد.

#### مدل‌سازی هدایت هیدرولیکی اشباع

به منظور مدل‌سازی از درخت تصمیم‌باینری و از الگوریتم C&R که برای رگرسیون به کار می‌رود، در نرم‌افزار MATLAB استفاده شد. متغیر هدف مورد بررسی ks بود و متغیرهای ورودی در چهار سناریو مختلف به صورت زیر بودند:

نسبت به متغیر ورودی مورد نظر محاسبه می‌شود (شیرانی، 1396).

#### نرم افزارهای مورد استفاده

برای محاسبه شاخص‌های آماری و توزیع نرمال داده‌ها از نرم افزار Minitab و آزمون Kolomogorov-Smirnov استفاده شد. مدل‌سازی به وسیله نرم افزار MATLAB2016 و رسم نمودارها به وسیله نرم افزار Excel انجام شد.

#### نتایج و بحث

نمونه‌های مورد آزمایش به منظور اندازه‌گیری نفوذ و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی در 6 بافت (سیلتی-کلی لوم، سیلتی کلی، کلی لوم، سیلتی لوم، لوم و سندی کلی-لوم) در کاربری‌های مختلف انجام پذیرفت. همانطور که در شکل 2 مشاهده می‌شود، بافت غالب نقاط سیلتی کلی-لوم بوده است.

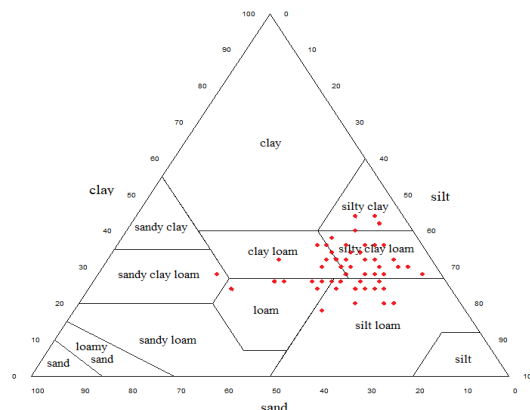
$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (4)$$

$$\%RMSE = (RMSE/m) * 100 \quad (5)$$

#### تحلیل حساسیت

برای بررسی اهمیت متغیرهای ورودی در مدل-سازی از تحلیل حساسیت به روش Stat Soft استفاده شد. در این روش ابتدا مدل با تمامی متغیرهای ورودی ایجاد و پس از رسیدن به بهترین عملکرد یا کمترین خطا، مقدار شاخص خطا محاسبه شده و در نظر گرفته می‌شود. سپس یک متغیر ورودی معین حذف شده و مدل دوباره با سایر ویژگی‌های ورودی ایجاد می‌شود. پس از رسیدن به مناسب‌ترین ساختار و عملکرد در مدل، مقدار شاخص خطا در این حالت نیز تعیین می‌شود. از نسبت شاخص خطا در حالت دوم (حذف یک ویژگی ورودی) به حالت اول (حضور تمام ورودی‌ها)، مقدار حساسیت خروجی



شکل 2- بافت‌های خاک مورد مطالعه در منطقه

مقاومت مکانیکی، مقاومت الکتریکی، ثابت دی الکتریک می‌باشند. شیرانی و رفیع نژاد (2012) از شبکه عصبی برای تخمین رطوبت زراعی و نقطه پژمردگی استفاده کردند و گزارش کردند بهترین نتیجه زمانی به دست می‌آید که از همه پارامترهای ورودی شامل شن، رس، ماده آلی، کربنات کلسیم و جرم ویژه ظاهری به همراه یکدیگر در یک مدل استفاده شود. حق‌وردی و همکاران (1390) از پارامترهای شن، رس، جرم ویژه ظاهری، رطوبت اشباع و هدایت هیدرولیکی اشباع برای تخمین منحنی رطوبتی خاک استفاده کردند و گزارش نمودند زمانی که پارامتر رطوبت اشباع به مدل اضافه گردید دقت شبکه در تخمین نقاط افزایش پیدا کرد.

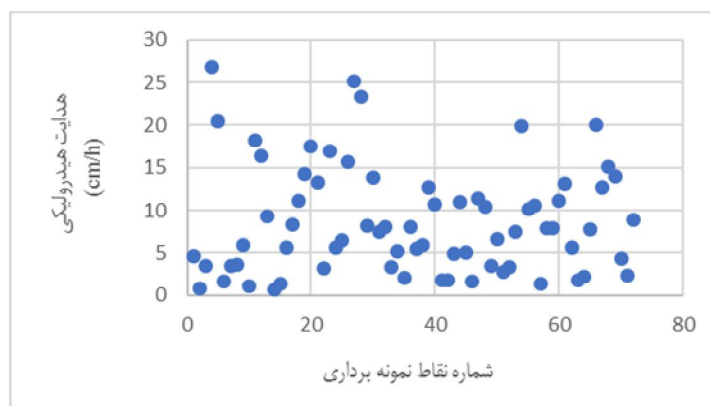
برخی ویژگی‌های کمیت‌های اندازه‌گیری شده که برای مدل‌سازی در سناریوهای مختلف به نرم‌افزار داده شدند در جدول 1 آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود همه کمیت‌های ورودی به جز میانگین هندسی قطر ذرات (Dg)، ثابت دی الکتریک و مقاومت نفوذ به ریشه دارای توزیع پراکندگی نرمال هستند. در بین کمیت‌ها، میانگین وزنی قطر خاکدانه و شوری دارای بیشترین توزیع پراکندگی هستند. کمیت‌های ورودی به نرم‌افزار نیز شامل: اسیدیته، شوری، رطوبت اشباع، آهک، ماده آلی، جرم مخصوص ظاهری، درصد رس و شن، پایداری خاکدانه خشک، پایداری خاکدانه مرطوب، میانگین و انحراف معیار هندسی قطر ذرات، درصد سنگریزه،

جدول 1- پارامترهای مورد استفاده به عنوان متغیر ورودی

پارامترها	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات	توزیع پراکندگی
اسیدیته	7	7/9	7/55	0/16	2/16	p>0/5
شوری (dS/m)	0/27	1/69	0/70	0/30	42/72	p>0/9
رطوبت اشباع (kg/kg)	0/25	0/51	0/40	0/063	15/53	p>0/44
آهک (%)	14/5	76/5	28/52	10/61	37/19	p>0/06
ماده آلی (%)	0/1	2/41	1/50	0/54	35/93	p>0/4
چگالی ظاهری	0/96	1/59	1/19	0/13	10/84	p>0/55
رس (%)	18	44	30/25	5/87	19/40	p>0/37
شن (%)	4	47	17/81	8/25	46/29	p>0/12
میانگین وزنی قطر خاکدانه خشک (mm)	0/56	1/51	0/99	0/227	22/85	p>0/99
میانگین وزنی قطر خاکدانه رطوب (mm)	0/12	0/8	0/38	0/150	38/97	p>0/78
میانگین هندسی قطر ذرات (mm)	0/01	0/064	0/02	0/01	48/7	p>0/025
انحراف معیار هندسی قطر ذرات ( $\sigma$ )	5/53	18/95	10/21	2/66	26	p>0/19
سنگریزه	0/8	43/7	18/28	13/21	72/29	p>0/30
مقاومت ویژه الکتریکی حقیقی ( $\Omega.m$ )	29/39	170/9	90/69	35/28	38/91	p>0/37
ثابت دی الکتریک	3	14/8	6/07	2/62	43/12	p>0/004
مقاومت نفوذ به ریشه (Kpa)	17/58	3881/28	313/73	519/18	165/48	p>0/000
هدایت هیدرولیکی (cm/h)	0/66	26/86	8/66	6/31	72/85	p>0/27

مقدار  $K_s$  مربوط به بافت سیلتی کلی لوم در کاربری کشاورزی و بیشترین مقدار مربوط به بافت کلی لوم در کاربری مرتع می باشد.

مقادیر اندازه گیری شده هدایت هیدرولیکی اشباع در نقاط مختلف در شکل 3 آمده است. به دلیل متنوع بودن بافت و کاربری ها و شرایط خاک مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع به دست آمده متغیر می باشد. کمترین



شکل 3- هدایت هیدرولیکی برآورد شده در بافتها و کاربری های مختلف

می شود (خامیس و همکاران، 2005). کاتنی و همکاران (2008) نیز بیان کردند از عواملی که سبب کاهش عملکرد شبکه های عصبی مصنوعی و افزایش خطا می شود، داده های پرت می باشد. داده پرت نمونه ای است که با مقادیر سایر نمونه ها در یک بانک داده متفاوت باشد. نمونه های پرت به دلایل متعددی مانند خطای اندازه گیری، ثبت یا وارد کردن داده ها می توانند ایجاد شده باشند یا در صورت

هدایت هیدرولیکی اشباع دامنه گسترده ای از نظر تغییرات دارد و مقدار آن بسته به نوع خاک از چند میلی متر در روز تا چند متر در روز متغیر است. از این رو در اندازه گیری هدایت هیدرولیکی اشباع داده های پرت وجود دارد که در مواجهه با داده پرت باید دید که این داده ها واقعی هستند یا اشتباهند به عبارتی در طبیعت رخ می دهند یا نه، داده های پرت سبب کاهش عملکرد شبکه های هوش مصنوعی هم برای آموزش و هم برای آزمون



دارد  $0 < R^2 < 1$ ، شاخص ضریب تبیین  $R^2$  هرچه به یک نزدیک‌تر باشد بهتر است. ضریب همبستگی در این پژوهش در سناریوهای اول و سوم 0/79 و در سناریوهای دوم و چهارم با جایگزینی ویژگی‌های ژئوفیزیکی و مکانیکی به ترتیب 0/83 و 0/82 برآورد شد. ضریب تبیین در سناریوهای دوم و چهارم با اختلاف جزئی بالاتر از سناریوهای اول و سوم بوده است. هم‌چنین میزان RMSE% در سناریو دوم و چهارم کمتر از دو سناریو دیگر بود، اما به طور کلی با توجه به RMSE% مدل‌سازی در هر چهار سناریو موفق بوده است. هنگل و هیوسینجاک (2006) بیان کردند که اگر RMSE% بین 0 تا 40 باشد تخمین خوب و مدل‌سازی قوی است، اگر بین 40 تا 70 باشد متوسط و در صورتی که بالای 70 باشد مدل‌سازی ضعیف است. همانطور که در جدول 2 مشاهده می‌شود RMSE% در خطاهای داده‌آموزشی و داده‌های آزمون رنجی بین 33 تا 39/5 داشته است که با توجه به گروهبندی RMSE% تخمین مدل‌سازی قوی می‌باشد.

صحیح بودن اندازه‌گیری، از جامعه‌ای متفاوت هستند و بیانگر یک اتفاق نادر می‌باشند.

#### مدل‌سازی با درخت تصمیم

مقایسه دقت الگوریتم در دو مرحله‌ی آموزش و آزمون در جدول 2 آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود، همانند بسیاری از مدل‌های دیگر، خطای مرحله آزمون بیشتر از مرحله آموزش است. لازم به ذکر است که ناهمگنی داده‌ها، عملکرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین را مختل و استفاده از آن‌ها را با مشکل مواجه می‌سازد. فرزادمهر و همکاران (1397) با مدل‌سازی هدایت هیدرولیکی به‌وسیله درخت تصمیم بیان نمودند که در مرحله آزمون، دقت مدل برای پیش‌بینی داده‌های جدید به خوبی مرحله آموزش نیست و عملکردش کاهش یافته است. برای ارزیابی عملکرد مدل درخت تصمیم، ضریب تبیین مهم‌ترین معیار ارزیابی است (جدول 2). ضریب تبیین مهم‌ترین معیاری است که به کمک آن می‌توان رابطه بین دو متغیر را توضیح داد و مقداری بین صفر و یک

جدول 2- مقایسه خطای داده آموزشی و خطای آزمون در متغیر هدف هدایت هیدرولیکی اشباع

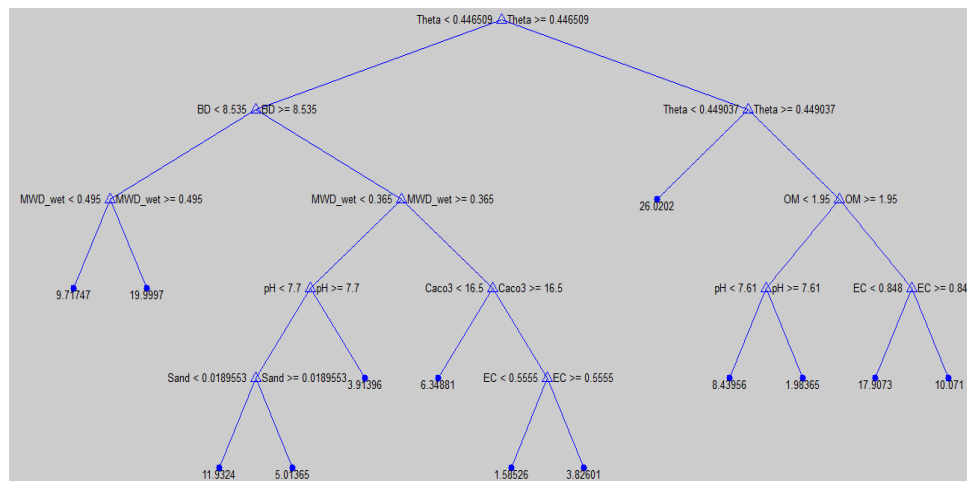
خطاها	خطای داده‌های آموزشی		خطای داده‌های آزمون		ضریب تبیین
	RMSE(cm/h)	%RMSE	RMSE(cm/h)	%RMSE	
سناریو اول	2/82	33	7/73	38	0/791
سناریو دوم	2/53	29/25	7/79	37/87	0/836
سناریو سوم	2/86	33	8/1	39/5	0/796
سناریو چهارم	2/61	30/19	7/17	35	0/825

در این پژوهش مقادیر هدایت هیدرولیکی به‌دست آمده در 72 نقطه به وسیله روش درخت تصمیم مدل‌سازی شدند. از آنجایی که با نمونه‌های کم آموزشی روش‌های ناپارامتری نتایج بهتری در مقایسه با روش‌های پارامتری دارند (ساروناس 1997؛ کورت، 2008) بنابراین امروزه روش‌های آماری ناپارامتری زیادی همانند الگوریتم درخت تصمیم گسترش یافته است. در درخت تصمیم مهم‌ترین عامل مؤثر در ریشه قرار گرفته و تقسیم انشعابات تا تشکیل گره برگ ادامه می‌یابد. در این پژوهش نتایج حاصل از مدل‌سازی درخت تصمیم نشان داد که مهم‌ترین عامل اثرگذار بر هدایت هیدرولیکی اشباع در سناریو اول، رطوبت و انحراف معیار هندسی قطر ذرات، در سناریو دوم ماده آلی، چگالی ظاهری، درصد سنگریزه و مقاومت مکانیکی در سناریو سوم رطوبت و وزن مخصوص ظاهری و در سناریو چهارم ماده آلی، چگالی ظاهری، درصد سنگریزه می‌باشند، که در طبقه بندی در بالاترین قسمت الگوریتم، یعنی گره ریشه قرار دارند. ماده آلی خاک هم بر میزان رطوبت و هم بر

فرزادمهر و همکاران (1397) هدایت هیدرولیکی اشباع را با استفاده از دو روش ناپارامتریک درخت تصمیم با بهره‌گیری از الگوریتم MSP و روش یادگیری بر پایه نمونه با بهره‌گیری از الگوریتم IBK با استفاده از ترکیب بهینه پارامترها که کمترین گاما را داشت، مدل‌سازی کردند و همبستگی بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری‌شده هدایت اشباع را 0/79 به دست آوردند. ایشان با مقایسه IBK با درخت تصمیم، با توجه به معیارهای  $R^2$ ، RMSE و MAE به این نتیجه رسیدند که مدل درخت تصمیم دقت بالاتر و همبستگی بهتری در پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع داشته است، هم‌چنین خطای هر دو مدل نزدیک به صفر و مشابه بودند اما در مدل درخت تصمیم پراکنش باقی‌مانده‌ها کمتر از IBK بوده و به صفر نزدیک‌تر است. از آنجایی که هدایت هیدرولیکی اشباع یک ویژگی با تغییرات بالاست، از این رو درخت تصمیم مدل بهتری در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع است.

(1390) بیان نمودند هدایت آبی اشباع بیشتر تحت تاثیر ویژگی‌های ساختمانی خاک به ویژه جرم ویژه ظاهری خاک و میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها می‌باشد، به عبارتی نتایج پژوهش نشان داد که جرم ویژه ظاهری و میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها بیشترین اثر را بر هدایت آبی اشباع داشتند.

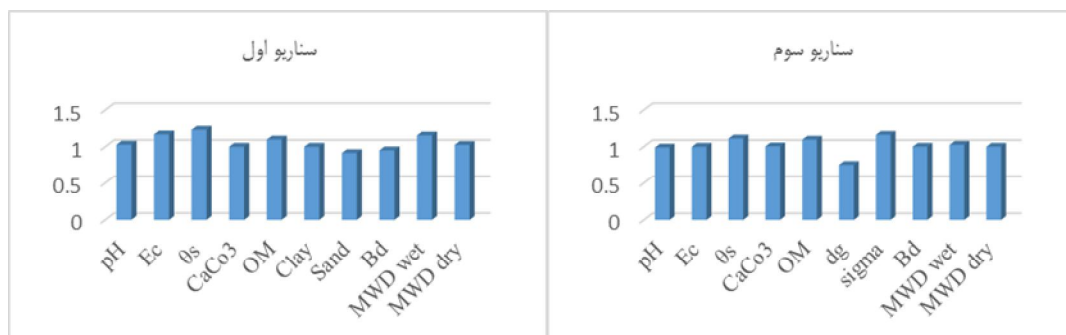
ویژگی‌های ساختمانی خاک تأثیر بسزایی دارد بنابراین با حذف رطوبت در سناریو دوم و چهارم ماده آلی در گره ریشه قرار گرفت. در (شکل 4) نمونه‌ای از طبقه‌بندی درخت تصمیم در سناریو سوم را نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بعد از رطوبت و جرم ویژه ظاهری، میانگین وزنی قطر خاکدانه دارای بیشترین تأثیر در ایجاد گره‌های جدید است. دهقانی بانیانی و همکاران



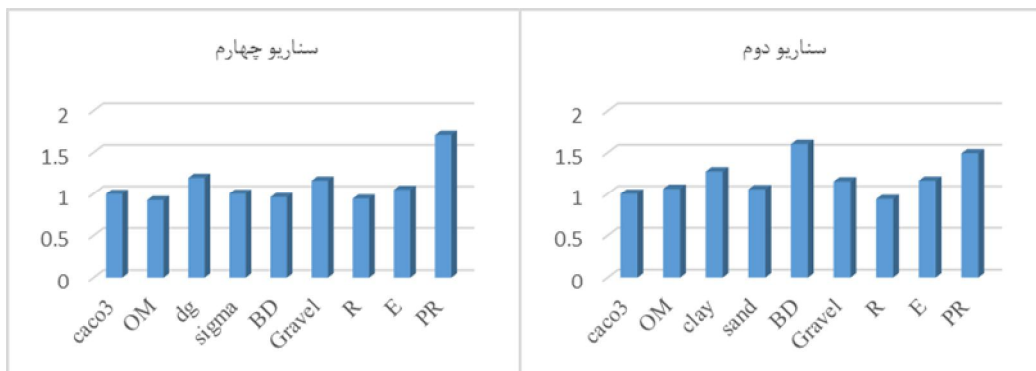
شکل 4- طبقه‌بندی درخت تصمیم‌گیری برای متغیر هدف هدایت هیدرولیکی اشباع در سناریو سوم

پارامترها به ترتیب درجه اهمیتشان و بر اساس میانگین گیری منشعب شده تا در نهایت به گره برگ و با کمترین درجه ناخالصی برسند. حساسیت هدایت هیدرولیکی به متغیرهای ورودی، در مدل‌سازی در هر چهار سناریو در شکل 5 مشاهده می‌شود.

انشعاب پارامتر مورد بررسی در درخت تصمیم باید تا جایی ادامه پیدا کند که به میزان ناخالصی مطلوب (کمترین ناخالصی) برسد. پس برای رسیدن زودتر به این درجه ناخالصی، فرزندی که درجه ناخالصی کمتری دارد انتخاب می‌شود تا زودتر انشعاب پارامتر مورد نظر متوقف و انشعاب پارامتر بعدی آغاز شود. بدین گونه تمامی







شکل 5- حساسیت پارامترهای ورودی به هدایت هیدرولیکی اشباع در سناریوها شامل: کمیت‌های ورودی عبارتند از: pH اسیدیته، EC شوری، CaCO<sub>3</sub> کربنات کلسیم، OM ماده آلی، Clay رس، Sand شن، MWD<sub>wet</sub> MWD<sub>dry</sub> میانگین وزنی قطر خاکدانه مرطوب و خشک، BD چگالی ظاهری، dg میانگین هندسی قطر ذرات، انحراف معیار هندسی قطر ذرات  $\sigma$ ، Gravel درصد سنگریزه، R مقاومت الکتریکی، E ثابت دی‌الکتریک، PR مقاومت نفوذ به ریشه

می‌دهد که این مدل‌ها حداقل به اندازه بقیه روش‌های مورد استفاده (کلاسیک رگرسیونی) خوب عمل می‌کنند و به خوبی بر مفروضات آماری درگیر با توابع انتقالی فائق می‌آیند (حق‌وردی و همکاران، 1390).

#### نتیجه‌گیری

به طور کلی روابط بین ویژگی‌های یک پدیده در طبیعت غیرخطی و پیچیده است که با آنالیزهای کلاسیک و خطی نمی‌توان این روابط را استخراج نمود در چنین مواردی استفاده از مدل‌های هوشمند مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی و درخت تصمیم که می‌توانند روابط غیرخطی و پیچیده را شناسایی کنند بسیار سودمند است. تحقیق حاضر با هدف بررسی اهمیت خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و ژئوفیزیکی خاک بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با استفاده از مدل‌سازی درخت تصمیم و با روش تخمین‌گر خطای cross validation Resubstitution انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد که هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در سناریو اول و سوم بیشتر تحت تأثیر کمیت‌های رطوبت اشباع، میانگین وزنی خاکدانه مرطوب، انحراف معیار هندسی قطر ذرات و ماده آلی، و در سناریو دوم و چهارم متأثر از ماده آلی، چگالی ظاهری و درصد سنگریزه و مقاومت مکانیکی و الکتریکی بوده است. خطای به‌دست آمده در هر چهار سناریو اختلاف جزئی داشته‌اند اما با حذف کمیت‌های رطوبت و میانگین وزنی قطر خاکدانه و افزودن مقاومت مکانیکی و ویژگی‌های ژئوفیزیکی در سناریو دوم و چهارم، ضریب تبیین افزایش و درصد خطای مدل‌سازی کاهش یافت. به طور کلی نتایج به‌دست آمده در این پژوهش با توجه به تعداد نمونه‌ها و بافت‌های مورد آزمایش مقدار مناسبی می‌باشد، هر چه تنوع بافت و تعداد نمونه‌های مورد

با توجه به شکل 5 مهم‌ترین کمیت‌های ورودی که متغیر هدف هدایت هیدرولیکی اشباع بیشترین حساسیت را در سناریوها دارد به ترتیب در سناریو اول شامل میانگین وزنی قطر خاکدانه مرطوب، رطوبت اشباع و شوری است (که دارای ضریب حساسیتی بالاتر از یک می‌باشند) و در سناریو دوم چگالی ظاهری، مقاومت نفوذ به ریشه، ثابت دی‌الکتریک، درصد رس و ماده آلی، در سناریو سوم انحراف معیار هندسی قطر ذرات، رطوبت اشباع، ماده آلی و میانگین وزنی قطر خاکدانه مرطوب و خشک و در سناریو چهارم مقاومت نفوذ به ریشه، میانگین هندسی قطر ذرات، درصد سنگریزه و ثابت دی‌الکتریک می‌باشند. شیرانی (1396) بیان نمود اگر مقدار ضریب حساسیت برای یک متغیر ورودی، بیشتر از یک باشد، آن متغیر سهم قابل توجهی در عملکرد مدل و خروجی آن دارد. اگر این نسبت از یک کمتر باشد، بدین معنی است که خطا در غیاب ویژگی‌های ورودی، کمتر از خطا در حضور آن است. بنابراین، این متغیر نه تنها اثر مثبت بر دقت مدل ندارد، بلکه تأثیر منفی نیز دارد.

در سال‌های اخیر روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی، هم‌چون الگوریتم ژنتیک، درخت تصمیم‌گیری، شبکه‌های عصبی و تئوری مجموعه‌های فازی به خوبی به‌عنوان یک راه‌کار جایگزین برای غلبه بر مشکلات روش‌های سنتی ارتقا یافته‌اند. تجربه نشان داده است که پیاده‌سازی ساختارهای محاسباتی سیستم بیولوژیکی می‌تواند منجر به ایجاد الگوهای محاسباتی بهتری برای مسایل مبهم و پیچیده شود (جورابیان و هوشمند، 2003). توابع انتقالی توسعه یافته با استفاده از شبکه‌های عصبی و هوش مصنوعی توسط محققان بسیاری مورد استفاده قرار گرفته است و تقریباً نتیجه تمامی پژوهش‌های پیشین نشان

تصمیم با دقت قابل قبولی توانسته است هدایت هیدرولیکی اشباع را در سناریوهای مختلف پیش‌بینی نماید هم‌چنین با جایگزینی ویژگی‌های ژئوفیزیکی و مقاومت مکانیکی به جای برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ضریب همبستگی مدل افزایش و مقدار خطا کاهش یافت که نشان‌دهنده ارتباط بیشتر این ویژگی‌ها با هدایت هیدرولیکی است.

آزمایش بیشتر باشد مدل‌سازی کارایی بیشتری خواهد داشت. فرزادمهر و همکاران (1397) نیز بیان نمودند در مدل‌سازی لازم است که از نمونه‌هایی استفاده شود که دارای تنوع بالا در بافت خاک باشند و از نظر خصوصیات زود یافت و هدایت هیدرولیکی اشباع، دامنه گسترده‌تری از مقادیر را شامل شوند. به طور کلی با توجه به نتایج به دست آمده از این تحقیق می‌توان دریافت که درخت

### فهرست منابع:

1. امیری چایجان، ر. 1388. برآورد متغیرها و بررسی اهمیت عوامل مؤثر در فرآیند خشک شدن بستر ثابت شلتوک به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی. مجله پژوهش صنایع غذایی (1): 73-55
2. ترابی، م. 1383. بررسی پنج روش اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع در یک خاک شور. دومین کنفرانس ملی دانشجویی منابع آب و خاک، شیراز. دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز، -SCSWR02-  
[https://www.civilica.com/Paper-SCSWR02-SCSWR02\\_035.html](https://www.civilica.com/Paper-SCSWR02-SCSWR02_035.html)
3. جورابیان، م.، هوشمند، ر. 1383. منطق فازی و شبکه‌های عصبی مصنوعی، مفاهیم و برنامه‌های کاربردی. صفحه 300.
4. حق وردی، ا.، قهرمان، ب.، جلیلی، م.، خشنودیزی، ع.، ا. عربی، ز. مقایسه روش‌های مختلف هوش مصنوعی در مدل سازی منحنی مشخصه رطوبتی خاک. 1390. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. 18(2): 65-84
5. خاشعی سیوکی، ع.، جلالی موخر، و.، نوفرستی، ع. م. و رمضانی، ی. 1393. ارزیابی روش غیرپارامتریک - نزدیک ترین همسایه و سیستم‌های شبکه عصبی مصنوعی برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار. 5 (3): 81-95.
6. دهقانی بانایی، س. قربانی دشتکی، ش. محمدی، ج. خداوردیلو، ح. خلیل مقدم، ب. 1390. مقایسه کارایی رگرسیون خطی چندگانه و رگرسیون درختی در برآورد هدایت آبی اشباع و پارامتر عکس طول درشت موئینگی خاک. نشریه پژوهش آب ایران. شماره 9. 193-204.
7. شیرانی، ح. 1396. شبکه‌های عصبی مصنوعی با رویکرد کاربرد در علوم کشاورزی و منابع طبیعی. انتشارات دانشگاه ولی عصر رفسنجان. صفحه 127.
8. شیرانی، ح.، و رفیع‌نژاد، ن. 1391. تخمینی از برخی خصوصیات خاک از دست رفته با عملکردهای رگرسیون و شبکه عصبی در کرمان. مجله تحقیقات خاک. 25(4): 349-359
9. فرزادمهر، م.، دستورانی، م.، خاشعی سیوکی، ع. 1397. مقایسه مدل‌های درخت تصمیم و یادگیری برپایه نمونه در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. 25(5): 167-184.
10. مهدیان، م.ح. 1384. هدایت هیدرولیکی خاک‌ها و نحوه کاربرد آن در طراحی شبکه‌های زهکشی. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. 6 (23): 170-159.
11. نصرتی کاریزک، ف.، موحدی نائینی، ع.، هزارجریبی، ل.، روشنی، ق.ع. و دهقانی، ا.ا. 1391. استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع از ویژگی‌های زودیافت خاک. مجله مدیریت خاک و تولید پایدار. 2 (1): 95-110
12. Bouwer H. 1986. Intake rate. Cylinder infiltrometer. In: Klute A. (Eds), Methods of soil analysis. Part 1. America Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin USA. pp. 825-843.

13. Bouyoucos G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agron. J.* 54: 464-465.
14. Cateni, S., Colla, V., and Vannucci, M. 2008. Outlier detection methods for industrial application methods for industrial applications. In: Aramburo, A. and Ramirez Trevino, A. (eds), *Advances in Robotics, Automation and Control.* (265-282). In Tech, Vienna, Austria.
15. Cosby, B.J., G.M. Hornberger, R.B. Clapp and T.R. Ginn. 1984. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water Resour. Res.* 20: 682-690.
16. Hengle, T. and Husnjak, S. 2006. Evaluation adequacy and usability of soil maps in Croatia. *Soil Science Society of America Journal*, 70:920-929.
17. Jabro, J.D. 1992. Estimation of saturated hydraulic conductivity of soils from particle size distribution and bulk density data. *Transactions of the ASAE*, 35: 2. 557-560.
18. Kao, C.S. and J.R. Hunt. 1996. Prediction of wetting front movement during one-dimensional infiltration into soils. *Water Resour. Res.* 9(2): 384-395.
19. Kemper, W. D. and Rose, N. C. 1986. Aggregate stability and size distribution. In Sparks D.L. (Ed.) *Methods of soil analysis.* American society of agronomy, Madison. pp: 425-442.
20. Khamis, A., Ismail, Z., Haron, Kh., and Tarmizi Mohammad, A. 2005. The effects of outlier data on neural network performance. *J. Appl. Sci.* 5: 8. 1394-1398.
21. Klute A. and Dirksen C. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. In: A. Klute(eds). *Method of soil analysis, Part1: Agronomy Soil Science Society of America Madison.W.I.* 687-734.
22. Kurt, I., Ture, M., and Kurum, A.T. 2008. Comparing performances of logistic regression, classification and regression tree, and neural networks for predicting coronary artery disease. *Expert System Applied*, 34(1): 366-374.
23. Leij, F., M.G. Schaap and L.M. Arya. 2002. Water retention and storage: Indirect methods. PP. 1009-1045. In: J.H. Dane and G.C.
24. Topp (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 4. SSSA Book Ser. No. 5.* SSSA, Madison, W
25. Mallant, D., Mohanty, B.P., Vervoort, A., and Feyen, J. 1997. Spatial analysis of saturated hydraulic conductivity in a soil with macropores. *Soil Technology.* 10: 115-131.
26. Minasny, B., J. Hopman, W.T. Harter, S.O. Eching, A. Toli and M.A. Denton. 2004. Neural networks prediction of soil hydraulic functions for alluvial soils using multistep outflow data. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 68: 417-429.
27. Moncada, M.P., Gabriels, D., and Cornelis, W.M. 2014. Data-driven analysis of soil quality indicators using limited data. *Geoderma.* 235: 271-278.
28. Page M.C. Sparks D.L. Noll M.R. and Hendricks G.J. 1987. Kinetics and mechanisms of potassium release from sandy Middle Atlantic Coastal Plain soils. *J. Soil Sci. Soc. Am.* 51: 1460-1465.
29. Rawls, W.J., T.J. Gish and D.L. Brakensiek. 1991. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. *Adv. Soil Sci.* 9: 213-234.
30. Sarunas, R. 1997. On dimensionality, sample size, and classification error of nonparametric linear classification algorithms *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 19: 667-671.
31. Schaap, M.G., Leij, F.J., and Van Genuchten, M.T. 2001. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *J. Hydrol.* 251: 3-4. 163-176.
32. Sobieraj, J.A., H. Elsenbeer and R.A. Veressy. 2001. Pedotransfer functions for estimating saturated hydraulic conductivity implications for modeling stormflow generation. *J. Hydrol.* 251: 202-220.

33. Walkley A. and Black I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.
34. Wenner, F. A Method of Measuring Earth Resistivity; Scientific Paper, Report No. 258; National Bureau of Standards; Gaithersburg, MD, USA, 1916; Volume 12, pp. 469-482.
35. Wosten, J.H.M., Ya.A. Pachepsky and W.J. Rawls. 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *J. Hydrol.* 251: 123–150.

## Hydraulic Conductivity Estimation Using Conveniently Available Soil Characteristics

**S. Mesri., Sh. Ghorbani Dashtaki<sup>1</sup>, H. Shirani, A. Kamkarrohani,  
H. Motaghian, and H. A. Bahrami**

PhD. Student, Soil Science Department, Faculty of Agriculture, University of Shahrekord, Iran;

E-mail: dorsa\_mesry@yahoo.com

Professor, Soil Science Department, Faculty of Agriculture, University of Shahrekord, Iran;

E-mail: shoja2002@yahoo.com

Professor, Soil Science Department, Faculty of Agriculture, University of Rafsanjan, Iran;

E-mail: shirani379@yahoo.com

Associate Professor, Miner Engineer, Geophysic Department, Faculty of Agriculture University of Shahroud, Iran; E-mail: kamkarr@yahoo.com

Assistant Professor, Soil Science Department, Faculty of Agriculture, University of Shahrekord, Iran;

E-mail: motaghian.h@yahoo.com

Professor, Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modarres University, Iran;

E-mail: bahramih@modares.ac.ir

Received: February, 2020 and Accepted: July, 2020

### Abstract

Soil saturated hydraulic conductivity is one of the most important physical characteristics of soils that affects water movement in soil. The aim of this study was to determine the most important parameters in prediction and modeling of saturated hydraulic conductivity from conveniently available parameters, using the decision tree and error estimator cross validation and re-substitution. In this study, 72 soil samples with six different textures were collected from the village of Morgmalek and Shahrekord District. Conveniently available soil properties were introduced into software in 4 scenarios (the first scenario: pH, EC, % sand, % clay, OM%, CaCO<sub>3</sub>, mean weight diameter of dry aggregate (MWD<sub>dry</sub>), mean weight diameter of wet aggregate (MWD<sub>wet</sub>), BD; the second scenario: CaCO<sub>3</sub>, OM%, % sand, % clay, BD, % gravel, electrical resistivity, dielectric constant, root penetration resistivity; the third scenario: pH, EC, Geometric mean diameter (dg), Geometric standard deviation ( $\sigma$ ), OM%, CaCO<sub>3</sub>, mean weight diameter of dry aggregate (MWD<sub>dry</sub>), mean weight diameter of wet aggregate (MWD<sub>wet</sub>), BD; and the fourth scenario: CaCO<sub>3</sub>, OM%, dg,  $\sigma$  BD, % gravel, electrical resistivity, dielectric constant, root penetration resistivity). Saturated hydraulic conductivity was measured with single ring. The results showed that moisture followed by structural features such as ( $\sigma$ ) in the first scenario, and OM and BD in the second scenario, BD and MWD in the third scenario, and OM and BD in the fourth scenario were the most important parameter affecting saturated hydraulic conductivity. Correlation between predicted data by decision tree and measured data in the second and fourth scenarios were 0.83 and 0.82, respectively, and 0.79 in the first and third scenarios. All four scenarios were successful in modeling with respect to error rate and %RMSE. However, the %RMSE in the second and fourth scenarios was lower and the correlation coefficient was higher than the other two scenarios. The RMSE values in the four scenarios were 0.79, 0.83, 0.79, and 0.82, respectively.

**Keywords:** Aggregate stability, Saturation moisture, Decision tree, Error estimator

<sup>1</sup> Corresponding author: Water and Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran