

## برآورد پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی با استفاده از ویژگی‌های فیزیکی، ژئوفیزیکی و مکانیکی خاک با درخت تصمیم‌گیری

سمیرا مصری<sup>۱</sup>، شجاع قربانی دشتکی<sup>۲\*</sup>، حسین شیرانی<sup>۳</sup>، ابوالقاسم کامکار روحانی<sup>۴</sup>، حمیدرضا متقیان<sup>۵</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۷/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۰۹)

### چکیده

امروزه استفاده از روش‌های نوین به منظور برآورد پارامترهای هیدرولیکی همانند منحنی مشخصه رطوبتی مورد توجه قرار دارد. هدف از این پژوهش برآورد عوامل اثرگذار در مدل‌سازی پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی، به وسیله خصوصیات زودیافت فیزیکی، ژئوفیزیکی و مکانیکی با استفاده از درخت تصمیم‌گیری و تخمین‌گر خطا اعتبار-سنجی متقاطع و بازجایگزینی می‌باشد. در این پژوهش، ۷۲ نمونه خاک از شش بافت مختلف از روستای مرغملک و شهرستان شهرکرد گردآوری شد. خصوصیات زودیافت خاک در دو سناریو (سناریو اول: کربنات کلسیم، ماده آلی، درصد شن و رس، چگالی ظاهری، pH، EC، میانگین وزنی قطر خاکدانه خشک و مرطوب و رطوبت اشباع، سناریو دوم: کربنات کلسیم، ماده آلی، درصد شن و رس، چگالی ظاهری، درصد سنگریزه، مقاومت الکتریکی، ثابت دی‌الکتریک، مقاومت فروری) به نرم‌افزار معرفی شدند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که ضریب همبستگی برای متغیرهای هدف PWP در سناریو اول ۰/۸۸ و در سناریو دوم برای متغیر هدف FC ۰/۹۳ بیشترین مقدار است. با جایگزینی ویژگی‌های ژئوفیزیکی و مکانیکی در سناریو دوم ضریب همبستگی برای متغیرهای FC و  $\alpha$  که متاثر از ساختمان و بافت خاک هستند افزایش و برای متغیرهای PWP و  $n$  و  $m$  که بیشتر متاثر از بافت خاک هستند، کاهش یافت. RMSE% نیز برای متغیرهای FC و  $\alpha$  در سناریو دوم با اختلاف جزئی کمتر از سناریو اول بود، اما به طور کلی با توجه به RMSE% مدل‌سازی برای همه متغیرهای هدف در هر دو سناریو موفق بوده است.

**واژه‌های کلیدی:** ثابت دی‌الکتریک، مقاومت الکتریکی، مقاومت مکانیکی، هوش مصنوعی

مصری س.، قربانی دشتکی ش.، شیرانی ح.، کامکار روحانی ا. و مقیان ح. ر. ۱۴۰۰. برآورد پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی با استفاده از ویژگی‌های فیزیکی، ژئوفیزیکی و مکانیکی خاک با درخت تصمیم‌گیری. تحقیقات کاربردی خاک ارومیه. جلد ۹، شماره ۴. صفحه: ۳۸-۴۸.

۱- دانشجوی دکترای گروه علوم خاک، دانشگاه شهرکرد

۲- استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد

۳- استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه ولی عصر رفسنجان

۴- دانشیار گروه ژئوفیزیک، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۵- استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

\*پست الکترونیک: [Shoja2002@yahoo.com](mailto:Shoja2002@yahoo.com)

## مقدمه

به‌دست آوردن ویژگی‌های فیزیکی خاک همواره یکی از دغدغه‌های مهندسی در کارهای کشاورزی، عمرانی و ژئوتکنیکی بوده است. در این راستا مهندسی ژئوفیزیک می‌تواند اطلاعات مفیدی از ویژگی‌های خاک را در مدت زمان کوتاهی در اختیار قرار دهد. رادار نفوذی به زمین (GPR) و دستگاه مقاومت الکتریکی از جمله ابزارهای ژئوفیزیکی هستند که می‌توانند در شناسایی و تخمین برخی ویژگی‌های زود-یافت خاک همانند رطوبت، بافت خاک مورد استفاده قرار گیرند. توابع انتقالی خاک و استفاده از ویژگی‌های زود-یافت خاک برای تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی و دیر-یافت خاک همواره مورد توجه بوده است. منحنی مشخصه رطوبتی خاک از جمله ویژگی‌های فیزیکی، و دیر-یافت خاک بوده و نشان دهنده کیفیت خاک است. روش‌های متفاوتی به منظور تخمین پارامترهای منحنی نگهداشت رطوبتی خاک و برازش مدل ون‌گنوختن وجود دارد که شامل روش‌های مستقیم و غیرمستقیم می‌باشد. به دلیل دشواری نمونه‌برداری، پرهزینه و زمان‌بر بودن روش‌های مستقیم برآورد منحنی مشخصه رطوبتی، استفاده از روش‌های غیرمستقیم و ویژگی‌های پایه‌ای و زودیافت که عمدتاً در عملیات شناسایی خاک به‌دست می‌آیند، به‌عنوان یک راه جایگزین در برآورد مستقیم ویژگی‌های هیدرولیکی مورد توجه می‌باشد (Minasny, 2007).

امروزه استفاده از روش الگوریتم درخت تصمیم برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی همانند پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی خاک مورد توجه قرار گرفته است. روش الگوریتم درخت تصمیم ابزاری قدرتمند و در عین حال رایجی هم برای دسته‌بندی و هم برای تخمین یا رگرسیون است (Shahrabi, 2011).

مدل درخت تصمیم به تولید قانون می‌پردازد. در ساختار درخت تصمیم، پیش‌بینی به‌دست آمده در قالب یک سری قواعد توضیح داده می‌شود. هم‌چنین در درخت تصمیم ضرورتی وجود ندارد که داده‌ها لزوماً به صورت عددی باشند (Meshkani, 2009 & Nazemi). مونکادا و همکاران (Moncada et al., 2014) برای تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی از مدل درخت تصمیم استفاده کردند. خاک به برخی ویژگی‌های فیزیکی، ژئوفیزیکی و مکانیکی با استفاده از مدل‌سازی با درخت تصمیم انجام شد.

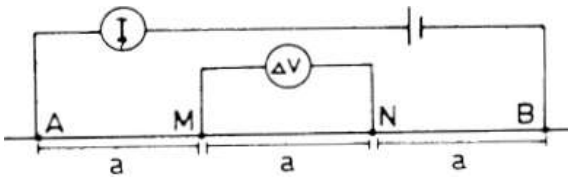
آن‌ها علاوه بر ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی از ویژگی‌های مورفولوژیکی خاک استفاده و مشاهده کردند که کاربرد ویژگی‌های مورفولوژیکی به همراه سایر ویژگی‌های خاک تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی را بهبود می‌بخشد. خاشعی‌سیوکی و همکاران (Khashei Siuki et al., 2015) بیان نمودند که درخت تصمیم‌گیری دارای توانایی بالایی در تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی با پارامترهای ورودی کمتر است. هم‌چنین درخت تصمیم قادر است بدون دخالت کاربر، ورودی‌های مهم‌تر را برای ایجاد قوانین استفاده و ورودی‌های ضعیف‌تر را حذف نماید. تحقیقات متعددی بر روی کارایی درخت تصمیم در صورت گرفته است که از جمله پژوهش‌های صورت گرفته می‌توان به پژوهش مصری و همکاران (Mesri et al., 2020) اشاره کرد که با استفاده از ویژگی‌های معمول فیزیکی و شیمیایی میزان رطوبت در نقاط ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم را به وسیله روش درخت تصمیم به‌دست آوردند. نمس و همکاران (Nemes et al., 2006) بیان نمودند که روش درخت تصمیم نسبت به سایر روش‌ها دارای توانایی بالاتری در تخمین ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم است.

مصری و همکاران (Mesri et al., 2020) با استفاده از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و ژئوفیزیکی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک را مدل‌سازی و بیان نمودند که درخت تصمیم در پیش‌بینی متغیر هدف در تمامی سناریوها موفق عمل کرده و با جایگزینی ویژگی‌های ژئوفیزیکی با شیمیایی نتایج مدل درخت تصمیم بهبود یافته است.

با توجه به اهمیت ویژگی‌های هیدرولیکی همانند منحنی مشخصه رطوبتی، بررسی کیفیت خاک‌ها از طریق شاخص‌های موثر بر کیفیت خاک همانند ویژگی‌های موثر بر منحنی مشخصه رطوبتی، امری ضروری می‌باشد. هم‌چنین تاکنون تحقیقات کمی در خصوص ویژگی‌های موثر بر منحنی مشخصه رطوبتی با استفاده از ویژگی‌های ژئوفیزیکی همانند ثابت دی الکتریک و مقاومت ویژه الکتریکی انجام شده است، بنابراین این مطالعه با هدف مقایسه حساسیت پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی

اشباع خاک به روش تهیه گل اشباع در آزمایشگاه و سپس خشک کردن در آون ۱۰۵ درجه به مدت ۲۴ ساعت تعیین شدند.

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



شکل ۱- قرارگیری الکترودها در آرایش الکترودی وئر  
Figure 1. Placement of electrodes in Wenner electrode arrangement

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 ۱ 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  $K = a \times 2 \times \frac{3}{14}$  ضریب آرایه یا عامل هندسی آرایش الکترودی است و  $a$  فاصله بین الکترودها می‌باشد.

ثابت دی الکتریک خاک نیز از طریق رابطه (۲) به دست آمده است.

$$E_{\text{soil}} = (C/V)^2 \quad (2)$$

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.

#### اندازه‌گیری منحنی رطوبتی

منحنی مشخصه رطوبتی نمونه‌های خاک دست‌نخورده (با استفاده از سیلندرهایی با ابعاد  $5 \times 5$ ) در مکش‌های (صفر، ۱، ۳، ۵، ۱۰) کیلوپاسکال توسط Sand box و مکش‌های (۳۰، ۵۰، ۱۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰) کیلوپاسکال به وسیله دستگاه صفحات فشاری اندازه‌گیری شد. رطوبت وزنی نمونه‌ها در مکش‌های گفته شده

#### مواد و روش‌ها

این پژوهش در حوزه آبخیز مرغملک (شهرستان شهرکرد، استان چهارمحال و بختیاری) انجام شد. زیرحوضه مرغملک در شمال غرب شهرستان شهرکرد (مرکز استان چهارمحال و بختیاری) و در محدوده جغرافیایی، عرض  $30^{\circ} 22' 30''$  و طول  $50^{\circ} 34' 30''$  تا  $50^{\circ} 22' 30''$  شهرکرد قرار دارد. بارش متوسط سالیانه ۴۰۰ میلی‌متر است که بیشتر در زمستان و بهار اتفاق می‌افتد. دمای متوسط سالانه ۲۳ درجه سانتی‌گراد با میانگین حداقل  $3/8$  و میانگین حداکثر  $30/7$  درجه سانتی‌گراد است. شهرستان شهرکرد نیز دارای اقلیم نیمه‌مرطوب 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 ۱:۲۵۰۰۰ 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 ۷۲ نمونه خاک از عمق صفر تا ۲۰ 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  $5 \times 5$  از سطح خاک برداشت شدند.

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

بافت خاک به روش هیدرومتری (Bouyoucos, 1962)، pH خاک در حالت گل اشباع با استفاده از دستگاه pH متر، قابلیت هدایت الکتریکی با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی در عصاره اشباع (Page et al., 1987)، کربن آلی با اکسیداسیون توسط دی‌کرومات پتاسیم (Walkley, 1934 & Black)، چگالی ظاهری نمونه‌ها با روش سیلندر با ابعاد معین (Klute, 1986 & Dirksen) and آهک، به روش خنثی کردن مواد خنثی-شونده با اسید کلریدریک و تیتراسیون اسید اضافی با سود، میانگین وزنی قطر خاکدانه (Mean Weight Diameter) با استفاده از الک خشک و مرطوب و رطوبت

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 یک بار 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،  $P_i$  مقادیر اندازه‌گیری شده و  $O_i$  مقادیر برآورد شده می‌باشد.

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (p_i - O_i)^2} \quad (5)$$

$$\%RMSE = (RMSE/m) * 100 \quad (6)$$

#### تحلیل حساسیت

برای بررسی اهمیت متغیرهای ورودی در مدل‌سازی 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 نسبت به متغیر ورودی مورد نظر محاسبه می‌شود (Shirani, 2017).

تعیین گردید و درصد رطوبت حجمی از حاصلضرب چگالی ظاهری در رطوبت وزنی خاک محاسبه شد.

#### مدل ون گنوختن

مدل ون گنوختن یکی از مدل‌های مهم برای توصیف منحنی مشخصه رطوبتی خاک است. در این مطالعه از این معادله برای برازش داده‌های اندازه‌گیری منحنی مشخصه رطوبتی استفاده شد. این معادله به شکل زیر است:

$$\theta = (\theta_s - \theta_r) \cdot [1 + (\alpha h)^n]^{-m} + \theta_r \quad (3)$$

که در آن  $\theta_s$  و  $\theta_r$  به ترتیب مقدار حجمی رطوبت اشباع و باقیمانده خاک،  $h$  مکش خاک (cm)،  $\alpha$  تقریباً معادل عکس پتانسیل در نقطه‌ی ورود هوا ( $\text{cm}^{-1}$ ) و  $n$  و  $m$  ضرایب بدون بعد معادله هستند که به خصوصیات خاک بستگی دارند. برای برازش مدل ون گنوختن از نرم‌افزار RETC استفاده شد.

#### مدل‌سازی نقاط مهم رطوبتی خاک و پارامترهای مدل وان گنوختن

به منظور مدل‌سازی از درخت تصمیم باینری و از الگوریتم C&R که برای رگرسیون به کار می‌رود، در نرم-افزار MATLAB استفاده شد. متغیرهای هدف شامل رطوبت نقطه‌ی پژمردگی دائم (PWP)، ظرفیت زراعی (FC) و پارامترهای  $\alpha$ ،  $n$  و  $m$  در مدل ون گنوختن بوده-اند. برای مدل‌سازی از دو سناریو مختلف استفاده شد.

متغیرهای ورودی در دو سناریو به صورت زیر بودند:

سناریو اول: کربنات کلسیم، ماده آلی، درصد شن و رس، چگالی ظاهری، pH، EC، میانگین وزنی قطر خاکدانه خشک و مرطوب و رطوبت اشباع.

سناریو دوم: کربنات کلسیم، ماده آلی، درصد شن و رس، چگالی ظاهری، درصد سنگریزه، مقاومت الکتریکی، ثابت دی الکتریک، مقاومت فروری (مقاومت مکانیکی).

لازم به ذکر است که شاخص‌های ساختمانی در مدل-سازی برای PWP در نظر گرفته نشد چون ارتباط کمتری با PWP دارند و PWP بیشتر به بافت بستگی دارد.

برای مدل‌سازی با استفاده از درخت تصمیم از تخمینگرهای خطای اعتبار-سنجی متقاطع (Cross Validation) و بازجایگزینی (Resubstitution) استفاده شد. در این روش مجموعه داده‌های اندازه‌گیری شده به  $k$  گروه تقسیم می‌شوند. ابتدا یک گروه کنار گذاشته شده و

## نرم افزارهای مورد استفاده

آهک، ماده آلی، چگالی ظاهری، درصد رس و شن، پایداری خاکدانه خشک، پایداری خاکدانه مرطوب، میانگین و انحراف معیار هندسی قطر ذرات، درصد سنگریزه، مقاومت مکانیکی، مقاومت الکتریکی، ثابت دی الکتریک می‌باشند. همانطور که مشاهده می‌شود همه کمیت‌های ورودی به جز میانگین هندسی قطر ذرات<sup>۱</sup> (Dg)، ثابت دی الکتریک<sup>۲</sup> و مقاومت فروری<sup>۳</sup> دارای توزیع پراکنش نرمال هستند. در بین کمیت‌ها، میانگین وزنی قطر خاکدانه و شوری دارای بیشترین توزیع پراکنش هستند.

برای محاسبه شاخص‌های آماری و توزیع نرمال داده‌ها از نرم افزار Minitab و آزمون Kolmogorov-Smirnov استفاده شد. مدل‌سازی به وسیله نرم افزار MATLAB<sup>۲۰۱۶</sup> و رسم نمودارها به وسیله نرم افزار Excel انجام شد.

## نتایج و بحث

برخی ویژگی‌های کمیت‌های اندازه‌گیری شده که برای مدل‌سازی در سناریوها به نرم‌افزار MATLAB داده شدند در جدول ۱ آمده است. کمیت‌های ورودی به نرم‌افزار شامل: اسیدیته، شوری، رطوبت اشباع،

جدول ۱- پارامترهای مورد استفاده به‌عنوان متغیرهای ورودی و هدف در مدل‌سازی با درخت تصمیم‌گیری

Table 1. Parameters used as input and target variables in modeling by the decision tree

parameters	Significance level	Coefficient of Variation	Standard deviation	mean	maximum	minimum
pH	p>0.5	2.16	0.16	7.55	7.9	7
Electrical conductivity(dS/m)	p>0.9	42.72	0.30	0.7	1.69	0.27
Saturation moisture(kg/kg)	p>0.44	15.53	0.063	0.40	0.51	0.25
Calcium Carbonate (%)	p>0.06	37.19	10.61	28.52	76.5	14.5
Organic matter (%)	p>0.4	35.93	0.54	1.5	2.41	0.1
Bulk density	p.0.55	10.84	0.13	1.19	1.59	0.96
Clay percentage	p.0.37	19.40	5.87	30.25	44	18
Sand percentage	P>0.12	46.29	8.25	17.81	47	4
mean weight diameter of dry aggregate (mm)	p>0.99	22.85	0.227	0.99	1.51	0.56
mean weight diameter of wet aggregate (Dg) (mm)	p>0.78	38.97	0.150	0.38	0.8	0.12
Geometric mean diameter(mm)	p>0.05	48.7	0.01	0.02	0.064	0.01
Geometric standard deviation	p>0.19	26	2.66	10.21	18.95	5.53
Gravel	p>0.30	72.29	13.21	18.28	43.7	0.8
Electrical Resistivity ( $\Omega$ .m)	p>0.37	38.91	35.28	90.69	170.9	29.39
Dielectric constant	p>0.004	43.12	2.62	6.07	14.8	3
Mechanical resistance (Kpa)	p>0.000	165.48	519.18	313.7	3881.28	17.58

## مدل‌سازی با درخت تصمیم

سناریو دوم ضریب همبستگی برای متغیرهای FC و  $\alpha$  که متاثر از ساختمان و بافت خاک هستند افزایش و برای متغیرهای PWP و n و m که بیشتر متاثر از بافت خاک هستند، کاهش یافت.

مقایسه دقت الگوریتم در دو مرحله‌ی آموزش و آزمون در جدول ۲ آمده است. همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود با جایگزینی ویژگی‌های ژئوفیزیکی و مکانیکی در

1.mean weight diameter of wet aggregate

2Dielectric constant

3Mechanical resistance

قوی است، اگر بین ۴۰ تا ۷۰ با شد متوسط و در صورتی که بالای ۷۰ باشد مدل سازی ضعیف است. همانطور که در جدول ۲ مشاهده می شود RMSE% در خطاهای داده آموزشی و داده های آزمون رنجی بین ۴/۳ تا ۲۳/۶۳ داشته است که با توجه به گروه بندی RMSE% تخمین مدل سازی قوی می باشد.

RMSE% نیز برای متغیرهای FC و  $\alpha$  در سناریو دوم با اختلاف جزئی کمتر از سناریو اول بود، اما به طور کلی با توجه به RMSE% مدل سازی برای همه متغیرها در هر دو سناریو موفق بوده است. هنگل و هیوسینجاک (Hengle, 2006 & Husnjak) بیان کردند که اگر RMSE% بین ۰ تا ۴۰ باشد تخمین خوب و مدل سازی

جدول ۲- مقایسه خطای داده آموزشی و خطای آزمون

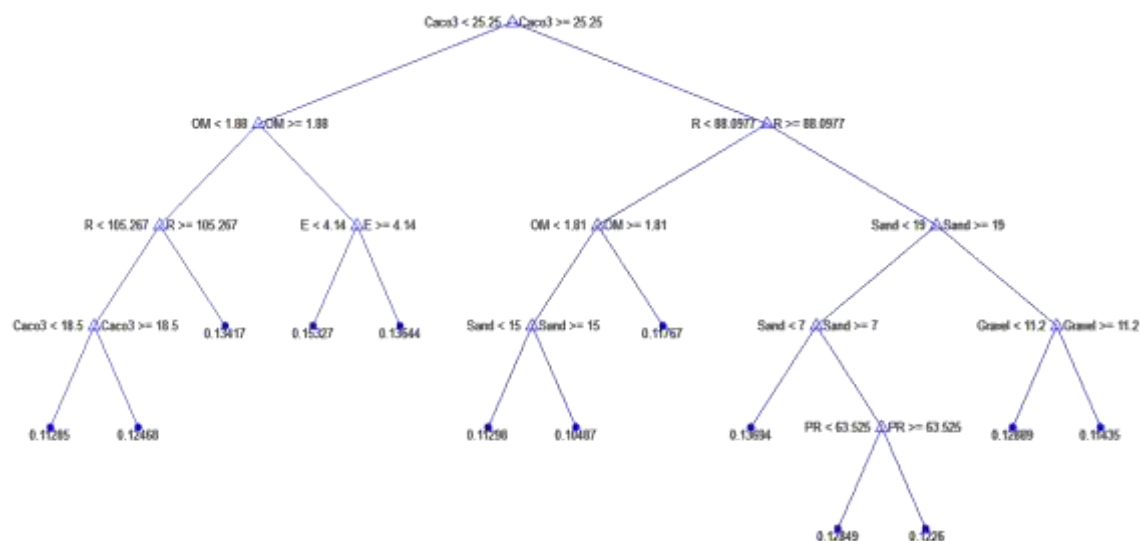
Table 2. Comparison of training data error and testing data error

Goal variables	Error training data				Error testing data				Correlation coefficient	
	First scenario		Second scenario		First scenario		Second scenario		First scenario	Second scenario
	RMSE	%RMSE	RMSE	%RMSE	RMSE	%RMSE	RMSE	%RMSE		
PWP	$4.7 \cdot 10^{-3}$	3.85	$7.6 \cdot 10^{-3}$	6.16	0.01	9.46	$1.74 \cdot 10^{-2}$	14.35	0.88	0.76
FC	$1.03 \cdot 10^{-2}$	6.61	0.01	4.37	0.03	15.34	$4.23 \cdot 10^{-2}$	18.01	0.83	0.93
$\alpha$	$4.5 \cdot 10^{-2}$	9.77	$4 \cdot 10^{-2}$	9.19	0.11	22.38	$12.1 \cdot 10^{-2}$	23.27	0.74	0.77
n	$24.2 \cdot 10^{-2}$	7.5	$22.4 \cdot 10^{-2}$	9.2	0.20	8.32	$58.5 \cdot 10^{-2}$	23.63	0.80	0.73
m	$2 \cdot 10^{-2}$	4.32	$2.9 \cdot 10^{-2}$	4.8	0.08	14.89	$7.68 \cdot 10^{-2}$	13.13	0.81	0.77

هم سبب افزایش سطح ویژه خاک است که در گره های ابتدایی قرار گرفت. مقاومت الکتریکی خاک نیز نمودی از میزان رطوبت خاک می باشد. مهم ترین عوامل اثرگذار در سناریو اول که شامل ویژگی های فیزیکی و شیمیایی معمول بود، شامل رس و رطوبت اشباع بوده است که در جدول ۳ قابل مشاهده است. بررسی نتایج سایر پژوهشگران همانند رضانی و همکاران (Ramezani *et al.*, 2011) که با ویژگی های فیزیکی و شیمیایی معمول نقطه پژمردگی دائم را تخمین زدند، نشان داد که مهم ترین متغیرهای تاثیرگذار در بیان میزان رطوبت در نقطه پژمردگی دائم، میزان رس و چگالی است. امیرعابدی و همکاران (Amir-Abedi *et al.*, 2013) نیز بیان نمودند که در بین ویژگی های فیزیکی و شیمیایی معمول، رس در بین سایر پارامترها بیشترین تاثیر را بر رطوبت نقطه پژمردگی داشته است. انشعاب پارامتر مورد بررسی 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 می شود تا زودتر انشعاب پارامتر مورد نظر متوقف و انشعاب پارامتر بعدی آغاز شود. بدین گونه تمامی پارامترها به ترتیب درجه اهمیتشان و بر اساس میانگین گیری منشعب شده تا در نهایت به گره برگ و با کمترین درجه ناخالصی برسند.

هاتسون و کاس (Hutson, 1987 & Cass) با بررسی منحنی مشخصه رطوبتی خاک و عوامل اثرگذار بر آن، با استفاده از توابع انتقالی بیان نمودند که به دلیل وابستگی رطوبت ظرفیت زراعی به ساختمان خاک، توابع انتقالی دقت کمتری در تخمین رطوبت ظرفیت زراعی نسبت به رطوبت پژمردگی دائم دارد. با مقایسه مقدار خطا در دو مرحله آموزشی و آزمون در جدول ۲ می توان دریافت که خطای مرحله آزمون بیشتر از مرحله آموزش است البته نکته قابل توجه این است که تفاوت خطا و دقت مدل برای دو مرحله آموزش و آزمون در هر دو سناریو مختصر است، که این به دلیل همگن بودن داده ها و کیفیت بالای آنها است.

نمودار درخت تصمیم نهایی برای مدل سازی در شکل ۲ نشان داده شده است. به طور کلی در ساختار درخت انشعابات بالاتر بیانگر اهمیت بیشتر متغیر ورودی در مدل سازی است. طبق شکل ۲ برای متغیر هدف PWP در سناریو دوم ویژگی کربنات کلسیم مهم ترین پارامتر اثرگذار می باشد که در طبقه بندی در بالاترین قسمت الگوریتم، گره ریشه قرار دارد. پس از کربنات کلسیم درصد ماده آلی و مقاومت الکتریکی پارامترهای اثرگذار بر نقطه پژمردگی دائم می باشند. کربنات کلسیم در خاک سبب چسبیدن ذرات به یکدیگر و افزایش سطح ویژه خاک می شود، ماده آلی هم نشان دهنده میزان رطوبت و



شکل ۲- طبقه‌بندی درخت تصمیم برای متغیر هدف نقطه پژمردگی در سناریو دوم

Figure 2. Classification of decision tree for target variable of PWP in the second scenario

مهم‌ترین عوامل اثرگذار و آغازکننده تقسیم و تعداد گره- های فرزند و برگ ایجاد شده در درخت تصمیم، برای متغیرهای هدف در جدول ۳ مشاهده می‌شود. طبق

جدول ۳ بیشترین گره‌های فرزند و برگ مربوط به متغیرهای هدف FC و  $\alpha$  در سناریو دوم می‌باشد.

جدول ۳- نتایج مدل‌سازی درخت تصمیم برای متغیرهای هدف

Table 3. Decision tree modeling results for target variables

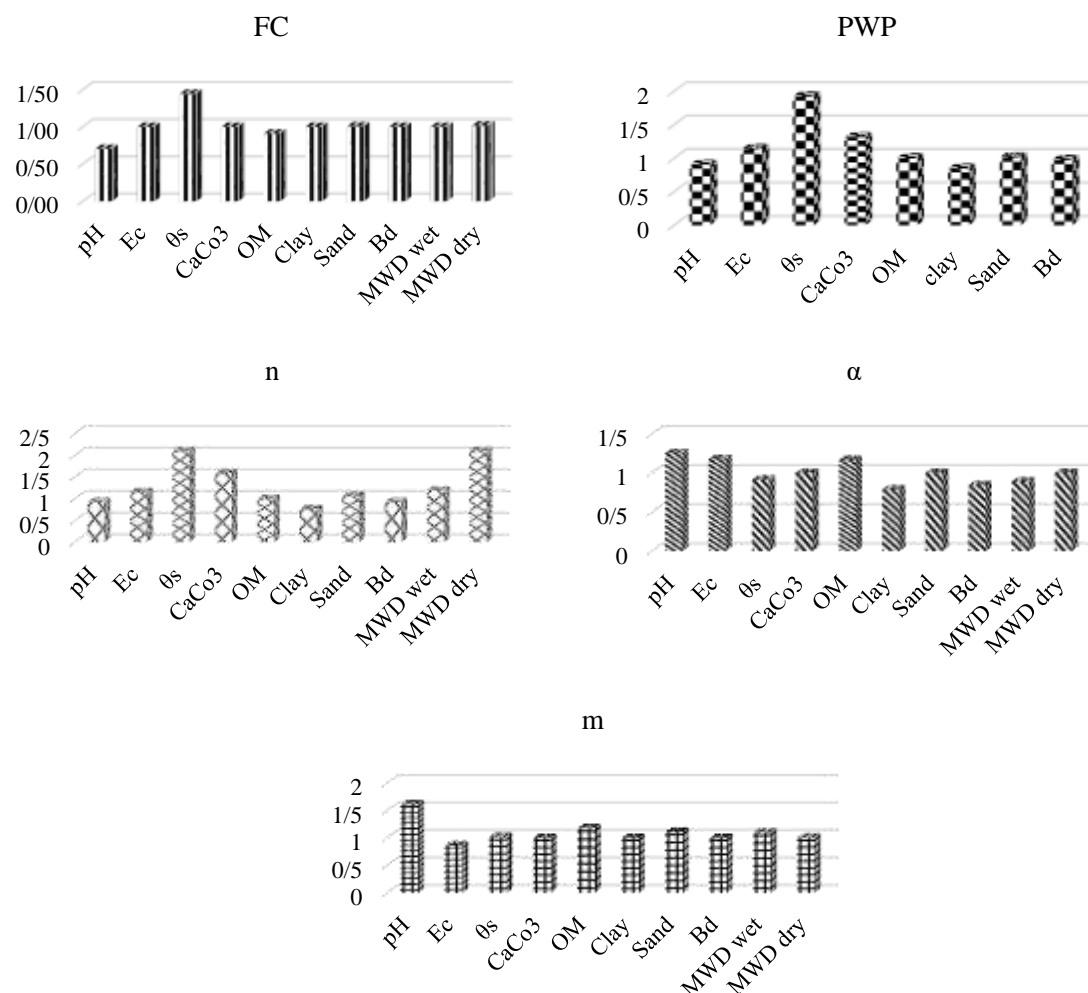
Goal	Scenarios	The most important factor influencing the root node and the initiator of division	Children node	Leaf node
PWP	First scenario	Clay- Saturated moisture	12	14
	Second scenario	Organic matter and Calcium carbonate	11	13
FC	First scenario	Saturated moisture	11	13
	Second scenario	Organic matter and Calcium carbonate	16	18
$\alpha$	First scenario	Clay- Saturated moisture	14	12
	Second scenario	Dielectric constant and Calcium carbonate	18	16
n	First scenario	Saturated moisture- mean weight diameter of wet aggregate	14	16
	Second scenario	Calcium carbonate-mechanical resistance	13	15
m	First scenario	Saturated moisture- mean weight diameter of wet aggregate	16	18
	Second scenario	Gravel percentage and mechanical resistance	12	14

متغیرهای رطوبت اشباع و میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت مرطوب و خشک و درصد شن اهمیت بیشتری دارند. میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت خشک و رطوبت اشباع نیز مهم‌ترین متغیرهای ورودی برای n می‌باشند. پهاش، ماده آلی، شوری، میانگین وزنی قطر

شکل‌های ۳ و ۴ اهمیت متغیرهای ورودی در مدل‌سازی با درخت تصمیم را نشان می‌دهند. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود در سناریوی اول مهم‌ترین متغیرهای تاثیرگذار بر نقطه پژمردگی دائم، رطوبت اشباع، آهک و هدایت الکتریکی است. برای رطوبت ظرفیت زراعی،

حساسیت برای یک متغیر ورودی، بیشتر از یک باشد، آن متغیر سهم قابل توجهی در عملکرد مدل و خروجی آن دارد.

خاکدانه خشک کمیت‌های موثر بر  $\alpha$  و پهاش، ماده آلی و درصد شن برای کمیت  $m$  اهمیت بیشتری داشته‌اند. شیرانی (Shirani, 2017) بیان نمود اگر مقدار ضریب



شکل ۳- کمیت‌های ورودی در سناریو اول

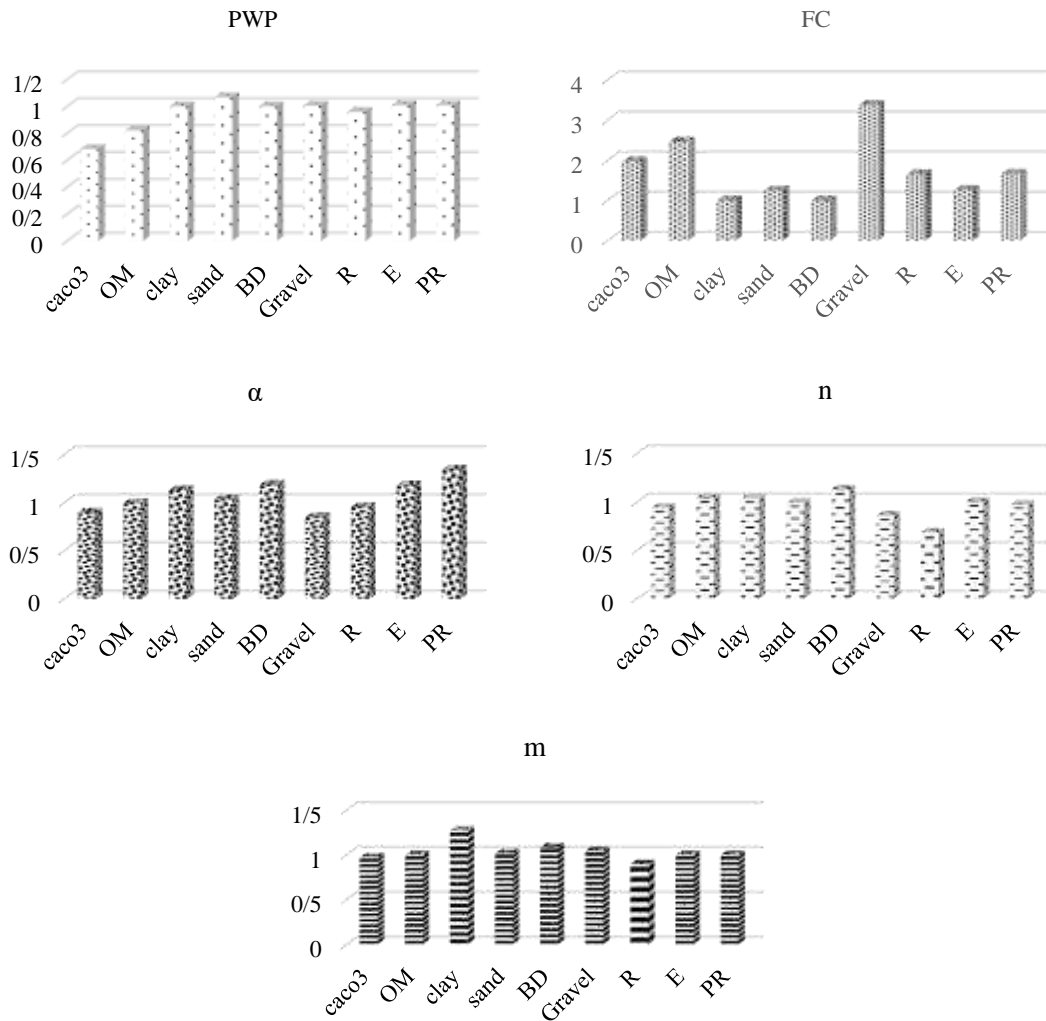
Figure 3. Input parameters are included in the first scenario

شامل: pH اسیدیته، EC شوری، CaCO<sub>3</sub> کربنات کلسیم، OM ماده آلی، Clay رس، Sand، MWD<sub>wet</sub> پایداری خاکدانه مرطوب و خشک، BD چگالی ظاهری

سنگریزه، ماده آلی و ثابت دی الکتریک بوده‌اند. لازم به ذکر است که مقاومت الکتریکی و ثابت دی الکتریک خاک نیز متأثر از جنس خاک، تراکم و میزان رطوبت خاک می‌باشند هرچه میزان رطوبت خاک بیشتر باشد مقاومت الکتریکی و سرعت نفوذ امواج راداری به داخل زمین کمتر و ثابت دی الکتریک افزایش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش رس در خاک سرعت نفوذ رادار کاهش، ثابت دی الکتریک افزایش و مقاومت الکتریکی خاک کاهش می‌یابد (Mesri et al., 2020).

سناریو دوم اهمیت متغیرهای ورودی بر FC و PWP پارامترهای مدل ون گنوختن نشان داده شده است. مهم-ترین پارامترهای اثرگذار بر PWP به ترتیب شامل درصد رس و شن، ثابت دی الکتریک، چگالی، مقاومت مکانیکی و درصد سنگریزه، بر FC شامل درصد سنگریزه، ماده آلی، آهک، مقاومت نفوذ به ریشه و مقاومت الکتریکی می-باشند، برای  $\alpha$  شامل مقاومت نفوذ به ریشه، ثابت دی الکتریک چگالی ظاهری، درصد شن و رس، برای  $n$  شامل چگالی، درصد رس، ماده آلی و ثابت دی الکتریک و برای  $m$  شامل درصد رس و شن، چگالی ظاهری، درصد





شکل ۴- کمیت‌های ورودی در سناریو دوم

Figure 4: Input parameters are included in the second scenario:

شامل: pH اسیدیته، EC شوری، CaCo3 کربنات کلسیم، OM ماده آلی، Clay رس، Sand شن،  $MWD_{wet}$   $MWD_{dry}$  میانگین وزنی قطر خاکدانه، مرطوب و خشک، BD چگالی ظاهری، dg میانگین هندسی قطر ذرات، انحراف معیار هندسی قطر ذرات  $\sigma_g$ ، Gravel درصد سنگریزه، R مقاومت الکتریکی، E ثابت دی‌الکتریک، PR مقاومت نفوذ به ریشه

### نتیجه‌گیری کلی

از آنجایی که منحنی مشخصه رطوبتی نشان‌دهنده بسیاری از ویژگی‌های خاک و برای هر خاکی منحصر به فرد است، هم‌چنین اندازه‌گیری آن دشوار و زمان‌بر است. بنابراین استفاده از توابع انتقالی و مدل‌های هوشمند مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی و درخت تصمیم‌گیری می‌توانند کمک شایانی به تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک کنند. نتایج این تحقیق نشان داد که منحنی مشخصه رطوبتی خاک بیشتر تحت تاثیر کمیت‌های رطوبت اشباع، ماده آلی و میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت مرطوب در سناریو اول و در سناریو

در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های هوش مصنوعی همانند درخت تصمیم‌گیری و شبکه‌های عصبی به‌عنوان یک راه‌کار مناسب و جایگزین برای غلبه بر مشکلات روش‌های سنتی ارتقا یافته‌اند. از مزیت‌های شبکه‌های هوش مصنوعی نسبت به روش‌های رگرسیون، علاوه بر دقت بالاتر و همبستگی بیشتر با پارامترهای ورودی، بر پیش‌فرض نرمال بودن توزیع داده‌ها استوار نیستند بنابراین اگر توزیع داده‌ها نرمال نباشند، تحلیل داده‌ها به روش شبکه‌های هوش مصنوعی همانند شبکه عصبی و درخت تصمیم‌گیری مشکلی را به‌وجود نمی‌آورد.

دوم بیشتر از ویژگی‌های ماده‌آلی، مقاومت الکتریکی، ثابت دی‌لکتریک و مقاومت مکانیکی تاثیر پذیرفت. در مجموع با حذف برخی ویژگی‌های شیمیایی در سناریو اول و جایگزینی آن‌ها با ویژگی‌های ژئوفیزیکی و مکانیکی در سناریو دوم ضریب همبستگی در نقطه ظرفیت زراعی FC و  $\alpha$  افزایش و RMSE% کاهش یافت. اما ضریب همبستگی در PWP، n و m در سناریو اول بیشتر از سناریو دوم و میزان خطا کمتر برآورد شد که نشان‌دهنده تاثیرپذیری بیشتر PWP، n و m از بافت خاک است.

## Reference

- Amir-Abedi H. Asghari Sh.A., Mesri-Gandshamin T., Keivanbehjo F. 2013. Estimating of field capacity, permanent wilting and available water content in Ardabil plain soils using regression and artificial neural network models. *Applied Soil Research*. 1 (1): 60-72. (In Persian)
- Bouyoucos G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal*. 54: 464-465.
- Farzadmehr M., Chahmani M., Khayaki Siouki AS. 2018. Comparing decision tree and instance-based learning models to estimate soil saturated hydraulic conductivity. *Journal of Soil and Water Conservation Research*. 25 (5): 167-184. (In Persian)
- Hengle T., and Husnjak S. 2006. Evaluation adequacy and usability of soil maps in Croatia. *Soil Science Society of America Journal*, 70:920-929.
- Hutson J.L., and Cass A. 1987. A retentivity function for use in soil-water simulation models. *Journal of Soil Science*. 38: 105-113.
- Kemper W.D., and RoseNau R.C. 1986. Aggregate stability and size distribution. In Sparks D.L. (Ed.) *Methods of Soil Analysis*. American society of agronomy, Madison. pp: 425-442.
- Khashei Siuki A., Jalali Moakhar V.R., Nofereesti A.M., and Ramazani Y. 2015. Comparing nonparametric k-nearest neighbor technique with ANN model for predicting soil saturated hydraulic conductivity. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*. 5: 3. 81-95. (In Persian)
- 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.
- Meshkani A.S., and Nazemi AS. 2009. *Introduction to Data Mining*. Ferdowsi University Press, Mashhad. 456P.
- Mesri S., Ghorbanidashtaki Sh., Shirani H., Kamkarrohani A., Motaghian H.M., and Bahrami H.A. 2020. Hydraulic conductivity estimation using different decision tree modeling scenarios. *Iranian journal of soil research*. (34): 143-154. doi.org/10.22092/ijsr.2020.122159
- Mesri S., Ghorbanidashtaki Sh., Shirani H., Kamkarrohani A., and Motaghian H.M. 2020. Evaluating the accuracy of some field methods for measuring soil moisture. *Journal of water research in agriculture*. 34 :93- 105. doi.org/10.22092/jwra.2020.121920
- Minasny B. 2007. Prediction soil properties. *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan*. 7: 54-67.
- Moncada M.P., Gabriels D., and Cornelis W.M. 2014. Data-driven analysis of soil quality indicators using limited data. *Geoderma*. 235: 271-278.
- Nemes A., Rawls W.J., and Pachepsky Y.A. 2006. Use of the nonparametric nearest neighbor approach to estimate soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal*. 70: 2. 327-336.
- 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. *Soil Science Society of America Journal*. 51: 1460-1465.
- Ramezani M., Ganbarian B., Liaghat A.M., and Salehi Khoshkroudi Sh. 2011. Developing pedotransfer functions for saline and saline- alkali soils. *Journal of Irrigation and Water Management*. 1(1): 99-110. (In Persian with English Summary)
- Shahrabi c. 2011. *Data Mining 2*. First edition, Amir Kabir University Industrial Jihad Press, Tehran. 300p.
- Shirani. H. 2017. *Artificial Neural Networks with an Application in Agricultural and Natural Resource Sciences*. Rafsanjan University Press. 320p. (In Persian)
- 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 Science Journal*. 37: 29-38.
- Wenner F. 1916. A method of measuring earth resistivity; Scientific Paper, Report No. 258; National Bureau of Standards; Gaithersburg, MD, USA; V (12), pp. 469-482.

## Estimation of moisture characteristic curve parameters using physical, geophysical and mechanical properties of soil

Samira Mesri,<sup>1</sup> Shoja Ghorbanidashtaki,<sup>2</sup> Hosein Shirani,<sup>3</sup> Abolghasem KamkarRohani,<sup>4</sup> Hamid Reza Motaghian<sup>5</sup>

(Received: October 2020 Accepted: July 2021)

### Abstract

Nowadays, the use of new methods to estimate hydraulic parameters such as soil moisture characteristic curve is considered. The aim of this study was to determine the effective factors in modeling of moisture characteristic curve parameters, from conveniently available, by the decision tree and error estimator cross validation and resubstitution were used. In this study, 72 soil samples were collected from six different tissues from the village of Margalomk and Shahrekord city. Conveniently available soil properties were introduced into software in 2 scenarios (the first scenario %sand, %clay, OM%, CaCO<sub>3</sub>, BD, pH, EC, mean weight diameter of dry aggregate (MWD<sub>dry</sub>), mean weight diameter of wet aggregate (MWD<sub>wet</sub>) and  $\theta_s$ , the second scenario %sand, %clay, OM%, CaCO<sub>3</sub>, BD, %gravel, electrical resistivity, dielectric constant, root penetration resistivity). The results showed that the correlation coefficient for the PWP target variables in the first scenario is 0.88 and in the second scenario the maximum value for the FC target variable is 0.93. By replacing, geophysical and mechanical properties in the second scenario, the correlation coefficient for the variables FC and  $\alpha$  Which are affected by the structure and texture of the soil increased, and decreased for PWP, n and m variables, which are more affected by soil texture. %RMSE was also slightly lower for the FC and  $\alpha$  variables in the second scenario than in the first scenario, but in general according to % RMSE, modeling for all variables was successful in both scenarios.

**Keywords:** Dielectric constant, Electrical resistivity, Mechanical resistivity, Artificial intelligence

Mesri S., Ghorbanidashtaki sh., Shirani H., Kamkarrohani A. and Motaghian, H. 2022. Estimation of moisture characteristic curve parameters using physical, geophysical and mechanical properties of soil. *Applied Soil Research*, 9(4): 38-48.

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

2. Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Shahrekord

3. Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Vali-e-Asr Rafsanjan

4. Associate Professor, Department of Geophysics, College of mining engineering, petroleum and geophysics, Shahrood University of Technology

5. Assistant Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Shahrekord

\* Corresponding Author Email: [Shoja2002@yahoo.com](mailto:Shoja2002@yahoo.com)