پژوهش‌های خاک / الف / جلد ۳۷ / شماره ۱ بهار / ۱۴۰۲

10.22092/ijsr.2023.360669.688

بررسی تأثیر کاربری‌های مختلف کشاورزی بر رطوبت بهینه خاک‌ورزی با استفاده ازمدل درخت تصمیم در دشت جیرفت

حسین شیرانی، فائزه رمضانی، سمیه صدر[۱]، و عیسی اسفندیارپور

استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی عصر رفسنجان؛ ***shirani@vru.ac.ir***

دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه ولی عصر رفسنجان؛***F-ramezani@yahoo.com***

استادیار گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور استان کرمان، مرکز رفسنجان؛ ***Ssadr@pnu.ac.ir***

استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی عصر رفسنجان؛ ***esfandiarpoor@vru.ac.ir***

ص 17 – 31

دریافت: ***1401/9/9*** و پذیرش: ***1401/12/9***

چکیده

رطوبت بهینه خاک برای خاکورزی رطوبتی است که اگر خاکورزی در آن انجام شود، با حداقل انرژی مصرفی بیشترین خردشدگی (نرم‌شدگی) در خاک ایجاد می‌شود. هدف از این پژوهش تعیین رطوبت بهینه برای عملیات خاک‌ورزی تحت کاربری‌های مختلف کشاورزی در منطقه‌ی جیرفت و بررسی کارایی مدل درخت تصمیم در این خصوص برای منطقه بود. برای این منظور نمونه‌های خاک (*90* نمونه) از عمق صفر تا *20* سانتی‌متر به صورت دست نخورده برداشته شده و برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن تعیین گردید. برای تعیین منحنی مشخصه رطوبتی خاک، مقدار رطوبت خاک در مکش های ماتریک *10، 30، 50، 100، 300، 500، 1000* و *1500* کیلوپاسکال با استفاده از دستگاه صفحه فشاری اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد نوع کشت تأثیر معناداری بر روی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و همچنین رطوبت بهینه نداشته است. در ادامه این پژوهش مدل‌سازی رطوبت بهینه با درخت تصمیم انجام شد. در این پژوهش از سه معیار ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (*NRSME*) برای ارزیابی مدل استفاده شد. نتایج ارزیابی نشان داد که استفاده از درخت تصمیم برای پیش‌بینی رطوبت بهینه خاک به دلیل دارا بودن *NRMSE* کمتر (*0/017*) و R^2 بالا (*0/75*)، مناسب است. هم‌چنین نتایج مدل‌سازی رطوبت بهینه خاک نشان داد که ماده آلی مهم‌ترین متغیر تاثیرگذار بوده و پس از آن به ترتیب متغیرهای درصد کربنات کلسیم معادل، رسانایی الکتریکی، درصدرس، چگالی ظاهری و درصد شن و سیلت در پیش‌بینی رطوبت بهینه اهمیت دارند.

واژه‌های کلیدی: منحنی مشخصه رطوبتی، نقطه عطف، درخت تصمیم، رطوبت بهینه، خاکورزی

---

[۱]. نویسنده مسئول؛ آدرس: *Ssadr@pnu.ac.ir*

مقدمه

چگونگی قرار گرفتن و اجتماع فضایی ذرات خاک، ساختمان خاک را می‌سازد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و عوامل اکولوژیک و انسانی در درازمدت بر ساختمان خاک اثر می‌گذارند. هم‌چنین ساختمان خاک با اثر بر چرخه‌ی کربن و دیگر عناصر غذایی، بر جذب، ذخیره و حرکت آب، تهویه، مقاومت مکانیکی و پایداری در برابر فرسایش، رشد گیاه و تولید محصول اثر به‌سزایی دارد (دیازوریتا و همکاران، *2002*).

ساختمان خاک یک ویژگی متغیر و بسیار تأثیرپذیر است که به شدت تحت تأثیر عملیات خاکورزی قرار می‌گیرد. تأثیر خاکورزی بر ساختمان خاک، ناشی از وضعیت رطوبتی خاک است، به گونه‌ای که برای انجام عملیات خاکورزی، پس از آبیاری و یا بارندگی، خاک باید به یک رطوبت بهینه (*Optimum Water Content*) برسد. رطوبت بهینه خاکورزی رطوبتی است که اگر خاکورزی در آن انجام شود، با حداقل انرژی مصرفی بیشترین خردشدگی (نرم‌شدگی) در خاک ایجاد می‌شود (دکستر و برد، *2001*). کلوخه‌ای شدن زمانی که خاک در رطوبت پایین‌تر از شرایط بهینه خاکورزی می‌شود، به‌وسیله الماراس و همکاران(*1962*) گزارش شده است. هم‌چنین در این شرایط، عملیات خاکورزی به انرژی بیشتری احتیاج دارد.

در زمانی که خاکورزی در شرایط مرطوب‌تر از رطوبت بهینه انجام شود، کلوخه‌های بزرگ ایجاد شده و عبور و مرور ماشین‌های کشاورزی باعث گل‌خرابی خاک، تغییر شکل ماندگار در ساختمان خاک و به‌وجود آمدن سله‌ی سطحی می‌گردد.

پدیده‌های مخرب ذکر شده بر فرآیندهای نفوذ آب و هوا در خاک، نگهداشت آب، هدایت هیدرولیکی و هدایت گرمایی خاک تأثیرگذار بوده و باعث افزایش روان‌آب سطحی و فرسایش خاک، کاهش حاصلخیزی و تولید محصول می‌گردد. خاکورزی باغ‌های مرکبات و نخیلات با مزارع متفاوت است. در باغ‌ها با هر بـار شـخم زدن و زیر و رو کردن زمین، میزان نفوذپذیری بستر خاک برای آب و هوا بیشتر و رشد آفات و علف‌های هرز نیز کاهش میابد (نادری وهمکاران، *1392*). نتایج مطالعات نادری و همکاران (*1392*) نشان داد که روش‌های خاکورزی اثر معنی‌داری بر تراکم و ترکیب علف‌های هرز باغات مرکبات داشته است به طوری که تراکم علف‌های هرز در تیمارهای کم خاکورزی به طور معنی‌داری کمتر از تیمارهای بدون خاکورزی بود. در تیمارهای بدون خاکورزی بیشتر علف‌های هرز چند ساله غالب بودند، در حالی که در تیمارهای کم خاکورزی علف‌های هرز یکساله غالب بودند. در نخیلات نیز عملیات شخم و آبیاری تأثیر زیادی بر کاهش فعالیت آفت چوبخوار داشته است(لطیفیان، *1395*). در سال‌های اخیر میانه کاری در فواصل درختان نخل، بسیار توصیه شده است چرا که علاوه بر اثرات مثبت اقتصادی به‌دلیل فعالیت‌های خاک‌ورزی (شخم، کود دهی، لایروبی نهرهای فرعی و ...) که در نخلستان انجام می‌شود بطور غیر مستقیم اثر بسیار مهمی در افزایش کمی و کیفی محصول خرمای نخیلات نیز دارد. لذا فعالیت‌های خاکورزی و تعیین رطوبت بهینه رای انجام آن، نه تنها در مزارع بلکه در باغ‌ها نیز به منظور دستیابی به بالاترین راندمان خاکورزی مورد نیاز است.

دکستر و بیرد (*2001*) روش‌هایی برای تعیین حدود رطوبتی بالایی و پایینی برای خاکورزی معرفی کرده و مقدار رطوبت بهینه را بر حسب پارامترهای معادله وان‌گنوختن تعیین کردند. ایشان رطوبت بهینه خاکورزی رطوبت بهینه خاکورزی را برابر با مقدار رطوبت خاک در نقطه‌ی عطف منحنی مشخصه رطوبتی خاک (منحنی مقدار رطوبت خاک در برابر لگاریتم مکش ماتریک) می‌دانند. در این نقطه مقدار انحنا برابر صفر است. پژوهش‌های دکستر و همکاران (*2005*) به منظور توسعه‌ی روش‌هایی برای پیش‌بینی رطوبت بهینه خاکورزی با استفاده از منحنی مشخصه رطوبتی خاک،

نشان دادند که ویژگی‌های خاک (مقدار رس، مقدار مواد آلی و چگالی ظاهری خاک) بر رطوبت بهینه تأثیر دارند. آنها هم‌چنین نشان دادند که محدوده‌ی رطوبتی مناسب برای خاکورزی با کاهش کیفیت فیزیکی خاک، باریک‌تر می‌شود.

اندازه‌گیری منحنی مشخصه رطوبتی خاک به منظور رسیدن به نقطه‌ی عطف زمان‌بر، پرهزینه و دشوار است. لذا می‌توان رطوبت بهینه خاکورزی را که خود یک ویژگی دیریافت و دشوار محسوب می‌شود، به‌وسیله‌ی ویژگی‌های زودیافت خاک توسط روش‌هایی از جمله تکنیک‌های یادگیری ماشین با دقت قابل قبولی برآورد نمود. این روش‌ها علاوه بر صرفه‌جویی در وقت و هزینه به شناسایی عوامل مؤثر بر رطوبت بهینه نیز کمک می‌کنند و قادرند روابط غیرخطی حاکم بین متغیرها را نیز شناسایی و مدل‌سازی کنند (شیرانی، *1396*). روش الگوریتم طبقه‌بندی درخت تصمیم از جمله روش‌های تخمین پارامترهای مؤثر منحنی مشخصه رطوبتی است. درخت‌های تصمیم ابزار قدرتمند و در عین حال رایجی هم برای دسته‌بندی و هم برای تخمین یا رگرسیون هستند. درخت تصمیم ساختاری است که برای تقسیم مجموعه بزرگی از داده‌های‌جمع‌آوری شده به مجموعه‌های کوچکتر زنجیره‌وار داده‌ها، بر اساس یک سری قوانین ساده تصمیم‌گیری به کار می‌روند. در هر تقسیم‌بندی متوالی، اعضای مجموعه‌های حاصل بیش از پیش به یکدیگر شباهت پیدا می‌کنند. درخت تصمیم برای بررسی داده‌ها، به منظور کسب شناخت بهتر روابط موجود بین تعداد زیادی از متغیرهای ورودی کاندید شده برای یک متغیر هدف نیز به کار می‌رود که مسأله بسیار مهم در این مدل، انجام درست دسته‌بندی یا پیش‌بینی است. با این که گونه‌های زیادی از الگوریتم‌های درخت تصمیم وجود دارد ولی همه آنها از روند مشابهی پیروی می‌کنند که از تقسیم مکرر داده‌ها به گروه‌های کوچک و کوچک‌تر استفاده می‌شود به نحوی که با توجه به متغیر هدف، هر نسل جدید گره‌ها، خالص‌تر از پیشینیان خود باشند. سرانجام وقتی امکان یافتن تقسیم‌بندی‌های بیشتری در هیچ جای درخت وجود نداشته باشد، درخت تصمیم کامل رشد کرده است (شهرابی، *1392*). الگوریتم های ساخت درخت تصمیم با تلاش در یافتن متغیر ورودی شروع می‌شود که بهترین تقسیم بندی داده‌ها را در میان گروه‌های دلخواه انجام می‌دهد .روش درخت تصمیم کاربرد وسیعی دراکتشاف داده‌ها، دسته‌بندی و امتیازدهی دارد (شهرابی، *1392*). ساختار ایده‌آل درخت تصمیم در کاهش فضای طبقه بندی،حداقل کردن تعداد گره‌ها، کنترل در هم پوشانی بین کلاس‌ها و کنترل تعداد شاخه ها نقش مهمی ایفا می‌کند .به همین جهت طراحی یک طبقه‌بندی کننده در درخت تصمیم‌گیری پیچیده است. مونکادا و همکاران (*2014*) مدل های درخت تصمیم را برای تخمین ویژگی-های هیدرولیکی در دو خاک گرمسیری و معتدل استفاده کردند. آن ها از ویژگی‌های مورفولوژیکی خاک علاوه بر ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی استفاده و مشاهده کردند که کاربرد ویژگی‌های مورفولوژیکی در کنار سایر ویژگی‌های خاک، تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی را بهبود داده و درختی با یک ساختار ساده‌تر ایجاد می‌شود. پژوهش‌های متعددی بر روی کارایی درخت تصمیم در زمینه علوم طبیعی صورت گرفته است و این مدل به لحاظ سادگی و ایجاد قوانین پیش‌بینی ارجحیت دارد . از طرفی مدل درخت تصمیم قادر است بدون دخالت کاربر، ورودی‌های مهمتر را برای ایجاد قوانین استفاده و ورودی‌های ضعیفتر حذف نماید.

از جمله پژوهش‌های صورت گرفته با استفاده از درخت تصمیم می‌توان به پژوهش نمس و همکاران (*2006*) اشاره کرد که با استفاده از روش درخت تصمیم و K نزدیکترین همسایه، نگه داشت آب در دو پتانسیل ماتریک *33-* و *1500-* کیلوپاسکال را با استفاده از داده‌های زودیافت خاک تخمین زدند و برتری این روش را در امکان استفاده از داده‌های محلی بیان نمودند. حقوردی و همکاران (*1389*) برای برآورد میزان رطوبت در دو نقطه

ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم از روش درخت تصمیم استفاده کردند.

شهرستان جیرفت از نظر کشاورزی بسیار پررونق و یکی از قطب های کشاورزی در کشور می‌باشد و محصولات عمده‌ی زراعی آن، سیب‌زمینی و پیاز و محصولات عمده‌ی باغی آن گردو، خرما و مرکبات می‌باشد. تا کنون هیچ کار پژوهشی در خصوص تعیین رطوبت بهینه تحت مدیریت‌های مختلف کشاورزی در این منطقه انجام نشده است. لذا در این پژوهش اهداف زیر دنبال میگردد: الف.تعیین رطوبت بهینه برای عملیات خاکورزی تحت کاربری‌های مختلف کشاورزی در منطقه‌ی جیرفت. ب. مدل‌سازی رطوبت بهینه با استفاه از ویژگی‌های زودیافت خاک به‌وسیله تکنیک‌های یادگیری ماشین. ج. بررسی اهمیت ویژگی‌های مختلف خاک بر رطوبت بهینه.

مواد و روش‌ها

منطقه‌ی مورد مطالعه

جیرفت، یکی از شهرستان‌های استان کرمان و یکی از مهم‌ترین دشت‌های ایران از نظر کشاورزی می‌باشد. این منطقه در حد فاصل عرض‌های جغرافیایی "40 '28 °28 تا "6 '52 °28 شمالی و طول‌های جغرافیایی "8 '30 °57 تا "27 '4 °58 شرقی واقع شده است. دشت جیرفت با میانگین ارتفاع 650 متر از سطح دریا، از جمله کم ارتفاع‌ترین دشت‌های داخلی ایران محسوب می‌شود (سازمان جغرافیایی وزارت دفاع و پشتیبانی نیروهای مسلح، 1382). میانگین بارندگی و دمای سالیانه‌ی جیرفت برای یک دوره‌ی آماری 20 ساله (سال‌های 1372 تا 1391) به‌ترتیب، 217/4 میلی‌متر و 21/8 درجه‌ی سلسیوس می‌باشد. اگرچه منطقه‌ی مورد مطالعه، دارای تنوع پوشش گیاهی است؛ ولی پوشش غالب آن شامل گونه‌هایی از تاغ، گز، کُنار، خرزهره و هندوانه‌ی ابوجهل می‌باشد. هم چنین در مورد گیاهان غالب زراعی و باغی آن می‌توان از گندم، جو، ذرت، مرکبات، خرما و گیاهان جالیزی نام برد (بنایی، 1380).

نمونه برداری

در این پژوهش ابتدا با استفاده از نقشه‌ی کاربری اراضی جیرفت، سه کاربری مختلف شامل، محصولات زراعی (سیب‌زمینی و پیاز)، مرکبات و خرما انتخاب و در هر کاربری 30 نقطه به صورت تصادفی تعیین گردید و در هر نقطه نمونه دست نخورده از خاک سطحی (عمق صفر تا 20 سانتی‌متری) انجام گرفت. نمونه‌ها برای انجام تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی لازم، به آزمایشگاه منتقل گردید.

تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی

پس از هوا خشک نمودن نمونه‌های برداشت شده و عبور آنها از الک دو میلی‌متری، تجزیه‌های آزمایشگاهی لازم بر روی آنها انجام شد. رسانایی الکتریکی عصاره‌ی اشباع خاک با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج (ریچارد، 1954)، واکنش خاک در گل اشباع با دستگاه پ.اچ متر (ریچارد، 1954)، بافت خاک به روش هیدرومتری (بایکاس، 1951)، چگالی ظاهری به روش کلوخه، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی (جونز، 2001) و درصد ماده آلی کل به روش والکی- بلاک (نلسون و سامرز، 1996) اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری منحنی مشخصه رطوبتی خاک

برای تعیین منحنی مشخصه رطوبتی خاک، مقدار رطوبت خاک در مکش‌های ماتریک 10، 30، 50، 100، 300، 500، 1000 و 1500 کیلوپاسکال با استفاده از دستگاه صفحه فشاری اندازه‌گیری شد. سپس مقادیر رطوبت وزنی خاک در مکش‌های ماتریک مورد بررسی با مدل ونگنوختن (معادله 1) برازش داده شد (ونگنوختن،1980) .

معادله (1)

$$\theta = (\theta_{SAT} - \theta_{RES})[1 + (\alpha h)^n]^{-m} + \theta_{RES}$$

در معادله فوق m و n ضرایب شکل منحنی بوده و θ مقدار رطوبت وزنی خاک در مکش h، θ_{SAT} مقدار رطوبت وزنی اشباع، θ_{RES} مقدار رطوبت وزنی باقیمانده‌ی خاک و α عکس مکش ورود هوا می باشد.

معادله (1) برای اکثر خاک‌ها به خوبی صادق است و منحنی مشخصه رطوبتی آنها را برازش می‌نماید. اگرچه تعدادی استثنا مربوط به خاک‌هایی که ساختمان یا ساختار منافذ آنها دو گانه است، وجود دارد اما در این پژوهش منحنی نگهداشت آب در خاک های مورد مطالعه از معادله (1) تبعیت کرد. در صورتی که منحنی معادله‌ی (1) به صورت $Ln(h)$ و یا h در برابر θ رسم شود، نقطه عطفی روی منحنی مشاهده می گردد که دارای خمیدگی صفر است. منحنی مشخصه رطوبتی در نقطه‌ی عطف دارای دو ویژگی است: موقعیت و شیب آن. دکستر و بیرد (2001) نشان دادند که رطوبت مناسب برای خاکورزی می‌تواند با مقدار رطوبت در نقطه‌ی عطف منحنی مشخصه رطوبتی خاک (θ_{INFL}) مربوط باشد. در معادله ونگنوختن θ_{INFL} به صورت زیر به دست می‌آید (دکستر و بیرد، 2005) :

معادله (2)

$$\theta_{INFL} = (\theta_{SAT} - \theta_{RES})\left[1 + \frac{1}{m}\right]^{-m} + \theta_{RES}$$

مقدار پتانسیل ماتریک در نقطه عطف (بهینه برای خاکورزی) نیز از معادله زیر به‌دست می‌آید (دکستر و بیرد، 2005):

معادله (3)

$$h_{INFL} = \frac{1}{\alpha}\left(\frac{1}{m}\right)^{\frac{1}{n}}$$

معادله های (2) و (3) برای بیان وضعیت رطوبت در شرایط بهینه برای خاکورزی به‌کار می‌رود. دکستر و بیرد (2001) اظهار داشتند که حد بالایی رطوبت (θ_{UTL}) برای خاکورزی می‌تواند به عنوان بخشی از رطوبت بین حد اشباع و رطوبت عطف به اضافه رطوبت عطف تخمین زده شود. آنها این بخش را برابر 0/4 درنظر گرفتند یعنی:

معادله (4)

$$\theta_{UTL} = \theta_{INFL} + 0.4(\theta_{SAT} - \theta_{INFL})$$

حد پایینی رطوبت (خشک) برای خاکورزی به طور قراردادی توسط دکستر و بیرد (2001)، رطوبتی تعریف گردید که در آن، مقاومت خاک دو برابر مقاومت آن در رطوبت بهینه خاکورزی است. این محققان این رطوبت را با استفاده از شکل ساده شده تئوری تنش موثر که توسط گریسن (1960) استفاده شد، تخمین زدند.

برای تعیین حد پایینی (θ_{LTL}) رطوبت بهینه خاکورزی از معادله 11 استفاده گردید (دکستر و همکاران، 2005). برای مطالعه جزئیات استخراج معادله مذکور به رفرانس مربوطه رجوع گردد.

معادله (5)

$$\theta_{LTL} = (\theta_{SAT} - \theta_{RES})[1 + (\alpha h_{LTL})^n]^{-m} + \theta_{RES}$$

دامنه رطوبتی مناسب برای خاکورزی را می توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

معادله (6)

$$R = \theta_{UTL} - \theta_{LTL}$$

محاسبات آماری

در این پژوهش، به منظور بررسی اثر کاربری‌های مختلف (شامل 3 نوع کاربری محصولات زراعی، مرکبات و خرما) بر رطوبت بهینه خاکورزی، آنالیزهای آماری در قالب طرح کاملاً تصادفی با 30 تکرار درمحیط نرم‌افزار SPSS 24 بررسی شد.

مدل‌سازی تخمین رطوبت و مکش ماتریک بهینه به روش درخت تصمیم

در این مطالعه از الگوریتم درخت تصمیم CRT[1] استفاده گردید. الگوریتم CRT، یک درخت باینری یک متغیره ایجاد می‌کند یعنی شاخه‌های خود را به صورت دوتایی و تنها بر اساس یک فیلد (متغیر مستقل) ایجاد می‌کند و هر گره غیر برگ آن، به دو گره دیگر تفکیک می‌شود. معیار انشعاب و شاخه‌زدن در درخت رگرسیون براساس حداقل کردن گوناگونی زیرمجموعه‌ی داخلی است. گوناگونی کم عبارت است از مجموعه‌هایی که اعضای یک کلاس در آن بر سایر کلاس‌ها غلبه کند و بهترین شاخه‌زدن آن است که گوناگونی در مجموعه‌ها را تا حد امکان کم کند. این الگوریتم برای متغیرهای کمی

---

[1] Classification and Regression Tree (CRT)

توسعه یافته است اما می‌تواند برای متغیرهای دیگر نیز مورد استفاده قرار گیرد. در این الگوریتم از ضریب استاندارد جینی (شاخص جینی) برای تقسیم داده‌ها در گروه‌های مختلف استفاده می‌شود و همچنین می‌توان از شاخص‌هایی مانند آنتروپی با سرعت بالاتر استفاده کرد (یوهانس، *1999*).

برای اجرای مدل‌سازی درخت تصمیم *CRT* از *MATLAB* نسخه‌ی *2016* استفاده گردید و از آنجا که جامعیت دادن به مدل برای داده‌ها و مناطق دیگر مد نظر نبود، تمامی داده ها به عنوان داده آموزشی مورد استفاده قرار گرفت.

متغیرهای بافت خاک، رسانایی الکتریکی عصاره‌ی اشباع، واکنش (*pH*) گل اشباع، چگالی ظاهری، کربنات کلسیم و ماده آلی به‌عنوان متغیر مستقل وارد مدل درخت تصمیم به روش رگرسیونی شدند (کوئین‌لان، *1996*؛ ویتن و فرانک، *2005*) و شبیه‌سازی‌ها برای پیش‌بینی متغیر هدف یا وابسته (رطوبت و مکش ماتریک بهینه برای خاکورزی به‌عنوان متغیر وابسته) صورت گرفت.

ارزیابی خطای مدل

پس از ساخت، مدل *CRT* بر روی داده‌های آزمون اجرا شده و نتایج شبیه‌سازی شده توسط مدل با مقادیر مشاهده شده برای متغیر هدف در آزمایشگاه، توسط معیارهای ارزیابی خطا شامل ضریب تبیین (R^2) (معادله *13*)، ریشه میانگین مربعات خطا (**RMSE**) (معادله *14*) و ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده (***NRMSE***) (معادله *15*) مورد مقایسه قرار گرفت.

معادله (*13*) (شیرانی، *1396*)

$$R^2 = \frac{\sum(P_i-\bar{P})^2}{\sum(O_i-\bar{P})^2} = 1 - \frac{\sum(O_i-P_i)^2}{\sum(O_i-\bar{P})^2}$$

ضریب تبیین، نشان دهنده‌ی بخشی از تغییرات کل است که به‌وسیله‌ی رابطه‌ی خطی موجود بین O و P توجیه می‌شود و اکثراً بر حسب درصد بیان می‌گردد. هرچه این ضریب به یک و یا بر حسب درصد به صد نزدیک‌تر باشد، کارایی مدل بهتر می‌باشد.

معادله (*14*) (شیرانی، *1396*)

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

این شاخص از جذر میانگین مربعات خطا به‌دست می‌آید.

معادله (*15*) (شرباکوف و همکاران، *2013*).

$$NRMSE = \frac{RMSE}{R_{train}}$$

در این روابطه، O_i مقدار متغیر هدف یا مقادیر مشاهداتی است که توسط معادلات ذکر شده برای هر رکورد(i) محاسبه گردیده است، $\bar{O}$ میانگین متغیرهای هدف یا مقادیر مشاهداتی، P_i مقدار خروجی مدل درخت تصمیم رگرسیونی به‌ازای رکورد i ام یا مقادیر تخمین زده شده ،N تعداد مشاهدات، e_i مقدار خطا به‌ازای هر رکورد و R_{train} دامنه متغیر وابسته استفاده شده در آموزش مدل است(شرباکوف و همکاران، *2013*). سپس اهمیت متغیرهای مؤثر بر رطوبت مناسب برای عملیات خاکورزی با تحلیل حساسیت تعیین شد.

نتایج

مطالعات آماری

جدول‌های *1* و *2* به ترتیب خلاصه آماری داده‌ها به تفکیک نوع کاربری و نتایج تجزیه واریانس ویژگی‌های خاک در کاربری‌های مختلف را نشان می‌دهد. با تعیین کلاس بافتی خاک در نمونه های خاک برداشته شده *8* نمونه کلاس بافت ریز تر از لوم، *28* نمونه کلاس بافت لوم و *54* نمونه کلاس بافت لومی شنی را نشان دادند و به طور متوسط بافت خاک هر سه کاربری لومی شنی تعیین گردید.

بر اساس نتایج تجزیه واریانس مشاهده شد که درصد ماده آلی خاک و *pH* خاک در کاربری های مختلف در سطح *1* درصد و درصد شن و رس در سطح *5* درصد تفاوت معنی‌داری را نشان دادند.

در جدول *3* رطوبت و مکش بهینه و نیز دامنه رطوبتی بهینه برای خاکورزی در منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است. دکستر و بیرد (*2011*) رطوبت حد بالای خاکورزی را برابر با رطوبت حد پلاستیک معرفی کردند آنها همچنین پیشنهاد کردند که رطوبت حد پایین

خاکورزی را می‌توان تقریباً برابر با *0/8* رطوبت پلاستیک دانست. آنها *0/9* رطوبت پلاستیک را به‌عنوان رطوبت بهینه خاکورزی معرفی کردند.

در مطالعه مذکور حد بالا و پایین رطوبت بهینه در خاک های لومی شنی مورد مطالعه به طور میانگین *0/47* و *0/26* به دست آمد. در این مطالعه رطوبت بهینه *18* درصد گزارش می‌گردد. لغوی و مرادی (*1996*) تأثیر رطوبت خاک را بر شرایط نهایی خاک، پس از انجام شخم توسط گاوآهن برگرداندار در یک خاک لوم رسی بررسی نموده و خرد شدن بهتر و یکنواخت‌تر خاک را در دامنه رطوبت *16* تا *18* درصد گزارش نمودند. برنتسن و بری (*2002*) رطوبت مناسب برای اجرای عملیات خاکورزی را که منجر به تشکیل حداکثر خاکدانه‌های ریز و حداقل کلوخه‌های درشت میگردد، در مقدار رطوبت نزدیک به *0/9* حد پایینی خمیری خاک گزارش نمودند.

مصدقی و همکاران (*2009*) مدلی را برای *10* خاک کشاورزی (از بافت لومی شنی تا بافت رسی) مورد ارزیابی قرار داده و نتایج به‌دست آمده را با محدوده های کاری مرسوم مورد مقایسه قرار دادند. نتایج نشان داد مقادیر رطوبت بهینه به‌دست آمده توسط مدل مذکور برای خاک‌های مختلف مورد مطالعه در محدوده *0/79-0/91* حد پلاستیک خاک قرار داشت.

در مطالعات مدلسازی، تغییرپذیری متغیرها بسیار حائز اهمیت است چرا که هر چه تغییر پذیری بیشتر باشد نتایج مدل معتبرتر است در این مطالعه ضریب تغییرات تمامی ویژگی ها در وضعیت مطلوبی قرار دارند (جدول*3*)

اثر کاربری‌های مختلف بر رطوبت بهینه خاکورزی

جدول *4* نتایج تجزیه واریانس برخی ویژگی‌های رطوبتی خاک در کاربری‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج حاصل، در کاربری‌های مختلف هیچ کدام از سه ویژگی رطوبت بهینه، مکش ماتریک بهینه و دامنه رطوبتی بهینه تفاوت معنی‌داری را در کاربری‌های مورد مطالعه نشان ندادند.

جدول *1*- خلاصه‌ی آماری مربوط به نمونه های مورد مطالعه با کاربری های مختلف در منطقه مطالعاتی

متغیر	میانگین	میانه	واریانس	انحراف معیار	کمینه	بیشینه	ضریب تغییرات (٪)
مرکبات (*30*)							
چگالی ظاهری ($g.cm^3$)	*1/56*	*1/56*	*0/007*	*0/086*	*1/40*	*1/75*	*5/53*
ماده آلی (٪)	*2/90*	*3/05*	*0/264*	*0/514*	*1/96*	*3/80*	*17/70*
کربنات کلسیم (٪)	*11/93*	*11/00*	*8/30*	*2/9*	*9/00*	*20/50*	*24/14*
رس (٪)	*15/45*	*13/50*	*27/30*	*5/23*	*7/50*	*29/50*	*33/84*	
سیلت (٪)	*29/17*	*32*	*192/25*	*13/86*	*2/00*	*50/00*	*47/54*
شن (٪)	*54/32*	*54/00*	*239/23*	*15/47*	*28/50*	*82/50*	*28/48*
رسانایی الکتریکی (dSm^{-1})	*3/00*	*2/94*	*1/034*	*1/02*	*1/10*	*5/61*	*33/91*
pH	*7/73*	*7/72*	*0/04*	*0/211*	*7/26*	*8/23*	*2/70*
محصولات زراعی(*30*)							
چگالی ظاهری ($g.cm^3$)	*1/60*	*1/60*	*0/018*	*0/134*	*1/34*	*1/78*	*8/52*
ماده آلی (٪)	*2/50*	*2/40*	*0/78*	*0/883*	*0/20*	*3/75*	*34/75*
کربنات کلسیم (٪)	*12/61*	*12*	*7/65*	*2/77*	*9/00*	*18/50*	*21/92*
رس (٪)	*14/63*	*13/25*	*19/93*	*4/46*	*7/50*	*26/50*	*30/50*
سیلت (٪)	*22/72*	*16/00*	*176/74*	*13/29*	*4/00*	*43/50*	*58/52*
شن (٪)	*62/65*	*64/5*	*216/04*	*14/7*	*88/50*	*37/00*	*23/46*
رسانایی الکتریکی (dSm^{-1})	*4/03*	*3/6*	*10/73*	*3/3*	*1/12*	*17/73*	*76/70*
pH	*7/80*	*7/8*	*0/04*	*0/2*	*7/44*	*8/26*	*2/40*
نخیلات(*30*)							

چگالی ظاهری ($g.cm^3$)	1/50	1/50	0/01	0/10	1/35	1/75	6/42
ماده آلی (٪)	2/85	2/85	0/224	0/47	1/3	3/50	16/60
کربنات کلسیم (٪)	12/00	13/50	21/20	4/6	9	27/5	34/16
رس (٪)	15/5	16/85	22/50	4/75	11/00	28/5	28/17
سیلت (٪)	28/00	27/62	233/10	15/3	1/5	62/00	55/28
شن (٪)	58/50	55/5	258/50	16/10	15	75/00	28/95
رسانایی الکتریکی (dS_m^{-1})	3/44	4/17	4/44	2/11	2/15	11/05	50/60
pH	7/90	7/90	0/02	0/16	7/65	8/22	2/00

تعداد نمونه‌ها برای هر کاربری = 30

جدول 2- نتایج تجزیه واریانس برخی از ویژگی‌های خاک در کاربری‌های مختلف

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات							
		ماده آلی	چگالی ظاهری	کربنات کلسیم	شن	سیلت	رس	PH	EC
کاربری	2	1/17**	0/002^{ns}	17/92^{ns}	607/86*	340/1^{ns}	37/7*	0/23/**	2/77^{ns}
خطا	87	0/42	0/01	12/38	237/92	200/69	23/27	0/03	5/40

**، * و ns به ترتیب نشان دهنده‌ی معنی دار بودن در سطح آماری 1 درصد، 5 درصد و عدم معنی داری می‌باشد.

جدول 3- خصوصیات آماری پارامترهای رطوبتی تخمین زده شده از معادلات منحنی مشخصه رطوبتی خاک در 90 نمونه از منطقه مطالعاتی

متغیر	واحد	میانگین	واریانس	انحراف معیار	کمینه	بیشینه	CV(%)
رطوبت بهینه	$KgKg^{-1}$	0/18	0/002	0/044	0/12	0/42	25
مکش ماتریک بهینه	KPa	99/00	941/7	30/70	70	220	31
حد بالایی رطوبت بهینه	$KgKg^{-1}$	0/47	0/142	0/379	0/07	1/68	80
حد پایینی رطوبت بهینه	$KgKg^{-1}$	0/26	0/35	0/59	0/07	0/9	72
دامنه رطوبتی بهینه	$KgKg^{-1}$	0/21	0/04	0/20	0	1/01	95

جدول 4- تجزیه واریانس رطوبت بهینه، دامنه رطوبت بهینه و مکش بهینه برای سه نوع کاربری (زراعی، مرکبات و خرما)

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات		
		رطوبت بهینه	مکش بهینه	دامنه رطوبت بهینه
کاربری	2	0/002^{ns}	1300/95^{ns}	0/001^{ns}
خطا	12	0/002	933/5	0/001
٪CV	-	33	72	43

**، * و ns به ترتیب نشان‌دهنده‌ی معنی‌دار بودن در سطح آماری 1 درصد، 5 درصد و عدم معنی‌داری می‌باشد.

جدول 5- ضریب همبستگی ساده (r) بین رطوبت بهینه خاکورزی و خصوصیات خاک ($n=90$)

	pH	رسانایی الکتریکی	کربنات کلسیم	ماده آلی	چگالی ظاهری	رس	سیلت	شن
رطوبت بهینه	1/140	0/184	0/037	+0/84**	0/026	0/36**	0/24	-0/45**

*معنی دار در سطح احتمال 5 درصد، ** معنی دار در سطح احتمال 1 درصد

جدول 6- شاخص های خطا در تخمین رطوبت بهینه ازمدل رگراسیون درخت تصمیم

ضریب تبیین	ریشه میانگین مربعات خطا	ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده
R^2	*RMSE*	*NRMSE*
0/75	*0/0052*	*0/017*

همبستگی بین رطوبت بهینه خاکورزی و خصوصیات خاک

جدول *5* نتیجه همبستگی بین رطوبت بهینه خاکورزی و خصوصیات خاک *90* نقطه نمونه برداری در منطقه مطالعاتی را نشان می‌دهد. ثروتی و همکاران (*1399*) در تخمین رطوبت بهینه خاکورزی در میاندواب همبستگی معنی‌دار بین رطوبت بهینه و محتوای رس خاک در سطح احتمال *1* درصد را گزارش کردند این در حالی است که مهدوی‌فر و همکاران (*1392*) نیز میان رطوبت بهینه خاکورزی با درصد ماده آلی، رس، کربنات کلسیم معادل همبستگی مثبت و با چگالی ظاهری و درصد شن همبستگی منفی را گزارش کردند. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، همبستگی معنی‌داری بین ماده آلی و درصد رس با رطوبت بهینه خاکورزی در سطح *1* درصد مشاهده گردید همچنین این ضریب بین رطوبت بهینه خاکورزی و شن همبستگی منفی معنی‌دار را در سطح *1* درصد نشان داد. که با نتایج سایر محققان هماهنگی دارد.

مدل‌سازی رطوبت بهینه با استفاده از الگوریتم درخت تصمیم

شکل *1* الگوریتم درخت تصمیم به روش رگرسیونی را نشان می‌دهد. به طورکلی در ساختار درخت، انشعابات بالاتر بیانگر اهمیت بیش‌تر متغیر ورودی در مدلسازی است. درخت حاصل با *18* گره فرزند و *19* گره برگ تشکیل شده است.

ارزیابی مدل

به منظور ارزیابی مدل درخت تصمیم از پارامتر ضریب تبیین(R^2) میانگین مربعات خطا (*RMSE*) و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (*NRMSE*) استفاده شد. نتایج این تحلیل در جدول *6* نشان داده شده است.

بحث

در این مطالعه نتایج نشان داد که *pH* خاک در این منطقه دارای کم‌ترین درصد ضریب تغییرات (*2/56*) می‌باشد. شاید بتوان دلیل این موضوع را آهکی بودن خاک‌های منطقه و همچنین خاصیت بافری بالای خاک عنوان کرد. این نتایج با گزارش‌های یثربی و همکاران (*2008*) و شیرانی و همکاران (*1400*) نیز همخوانی دارد. نتایج به‌دست آمده، نشان می‌دهد که واکنش خاک منطقه‌ی مورد مطالعه، در محدوده‌ی قلیایی می‌باشد. *pH* خاک بر عواملی مانند قابلیت استفاده عناصر غذایی مورد نیاز گیاهان، تحرک عناصر سنگین و فعالیت میکروارگانیسم‌های خاک مؤثر می‌باشد. *pH* خاک ممکن است در اثر مدیریت‌های مختلف اراضی تغییر نماید.کشت و زرع به‌دلیل تأثیر بر فعالیت میکروارگانیسم‌ها و کربن آلی خاک موجب افزایش اسیدیته خاک خواهد شد (غلامی و همکاران، *1395*). با توجه به واریانس کم *pH* تییرات اندک در این ویژگی میتواند باعث معنی‌دار شدن تفاوت آن در کاربری‌های مختلف شده باشد.

بیشترین ضریب تغییرات (*62/2*) مربوط به رسانایی الکتریکی می‌باشد. علت این امر می‌تواند عوامل انسانی نظیر عملیات خاک‌ورزی و استفاده از کوددهی باشد که باعث غیر یکنواختی *EC* لایه سطحی خاک می‌شود (ویلدینگ، *1985*). بر اساس نتایج حاصل، بیش‌ترین مقدار ماده آلی مربوط به کاربری مرکبات می‌باشد. بالا بودن ماده آلی در کاربری مرکبات می‌تواند به واسطه پوشش درختی مطلوب، توان حفظ رطوبت خاک

و پویایی اکوسیستم باشد که در نتیجه بیش‌ترین میزان کربن آلی ورودی به خاک را داشته است. تقی پور و همکاران (*1398*) در بررسی خود در منطقه توتکابن استان گیلان گزارش کردند که بیشترین مقادیر ماده آلی ذره‌ای، ماده آلی هم اندازه سیلت و رس، کربوهیدرات و ذخیره کربن مربوط به جنگل و کم‌ترین مقادیر مربوط به مرتع است. نتایج نشان داد که بیشترین درصد کربن آلی ذره‌ای در خاکدانه‌های درشت وجود دارد. بنابراین، عواملی که پایداری و تخریب این خاکدانه‌ها را کنترل می‌کند، می‌تواند ذخایر کربن آلی خاک را نیز کنترل نماید.

در مطالعه حاضر کمترین ماده آلی مربوط به اراضی زراعی بود. رضایی‌نژاد و همکاران (*1390*) نیز در مطالعات خود در دشت سیرجان نشان دادند که تغییر کاربری اراضی از مرتع به کشاورزی، باعث افزایش ماده آلی خاک شده است. کم‌ترین مقدار ماده آلی نیز مربوط به کاربری مزرعه می‌باشد. شاید بتوان دلیل این موضوع را این‌گونه بیان کرد که در اراضی زراعی، بخش عمده‌ی گیاه برداشت می‌شود و تنها بخش اندکی از قسمت‌های هوایی و ریشه‌ها در خاک باقی می‌مانند و با هر بار کشت‌وکار در این اراضی، مقدار قابل توجهی از ماده‌ی آلی در خاک تجزیه می‌شود.

همچنین نتایج نشان داد اگر چه تفاوت معنی‌داری بین مقدار کربنات کلسیم در کاربری های مورد مطالعه مشاهده نشد اما کمترین مقدار کربنات کلسیم در کاربری مرکبات و بیشترین مقدار آن در کاربری نخیلات بود. کاهش این پارامتر در کاربری مرکبات نسبت به بقیه کاربری‌ها احتمالاً به‌دلیل آبیاری بیشتر در کاربری مرکبات نسبت به بقیه کاربری‌ها می‌باشد. همچنین پایین بودن کربنات کلسیم در کاربری مرکبات می‌تواند به‌دلیل عدم برگشت کلسیم به خاک در نتیجه برداشت محصول باشد (شیران‌پور و همکاران *1391*).دلیل دیگری که می‌توان برای پایین بودن کربنات کلسیم در کاربری مرکبات بیان کرد این است که با توجه به این‌که اغلب کودهای نیتروژنی و بسیاری از کودهای آلی نیتروژن‌دار که در کاربری‌های زراعی و باغی استفاده می‌شود، خاصیت اسیدی دارند و با اکسیداسیون هر کاتیون آمونیوم به آنیون نیترات، دو یون پروتون تولید می‌شود، در نتیجه اسیدیته افزایش می‌یابد، لذا افزایش اسیدیته می‌تواند سبب آبشویی و کاهش میزان کلسیم گردد (شیران پور و همکاران *1391*).

براساس نتایج، رسانایی الکتریکی در کاربری نخیلات بیش‌ترین مقدار و در مرکبات کم‌ترین مقدار را داشت. با این وجود مقدار رسانایی الکتریکی در کاربری‌های مختلف تفاوت معنی‌داری را نشان نداد. رسانایی الکتریکی خاک نماینده میزان املاح هادی محلول خاک می‌باشد. افزایش مقدار رسانایی الکتریکی در کاربری نخیلات احتمالاً وابسته به فعالیت‌های مدیریتی از جمله کوددهی است. نیک نهاد و مارامایی (*1390*) در مطالعه اثرات تغییر کاربری اراضی بر خصوصیات خاک حوضه آبخیز کچیک گزارش کردند که رسانایی الکتریکی خاک زراعی در مقایسه با جنگل و مرتع (مناطق بکر و دست نخورده) هر چند تفاوت معنی‌داری نداشت، اما شوری خاک زراعی بیشتر بود که دلیل این امر را افزایش کود به زمین زراعی بیان کردند بنابراین یکی از دلایل بیشتر بودن رسانایی الکتریکی اراضی نخل می‌تواند استفاده از کودهای شیمیایی در این کاربری باشد لازم به ذکر است که نمونه برداری از اراضی کاربری نخل بعد از کوددهی انجام شد در حالی‌که نمونه برداری از دو کاربری دیگر بعد از بارندگی شدید انجام شد بنابراین کم بودن رسانایی الکتریکی در دو کاربری دیگر می‌تواند به‌دلیل آبشویی ناشی از بارندگی باشد. همچنین کربنات کلسیم خاک کاربری نخل در مقایسه با دو کاربری دیگر بیشتر بود. در واقع در رسانایی الکتریکی پایین‌تر آهک و در رسانایی الکتریکی بالاتر *NaCl* نقش اصلی را بر عهده دارند که تغییرات رسانایی الکتریکی خاک کاربری‌های مورد مطالعه نیز مؤید نقش آهک در آن‌ها است.

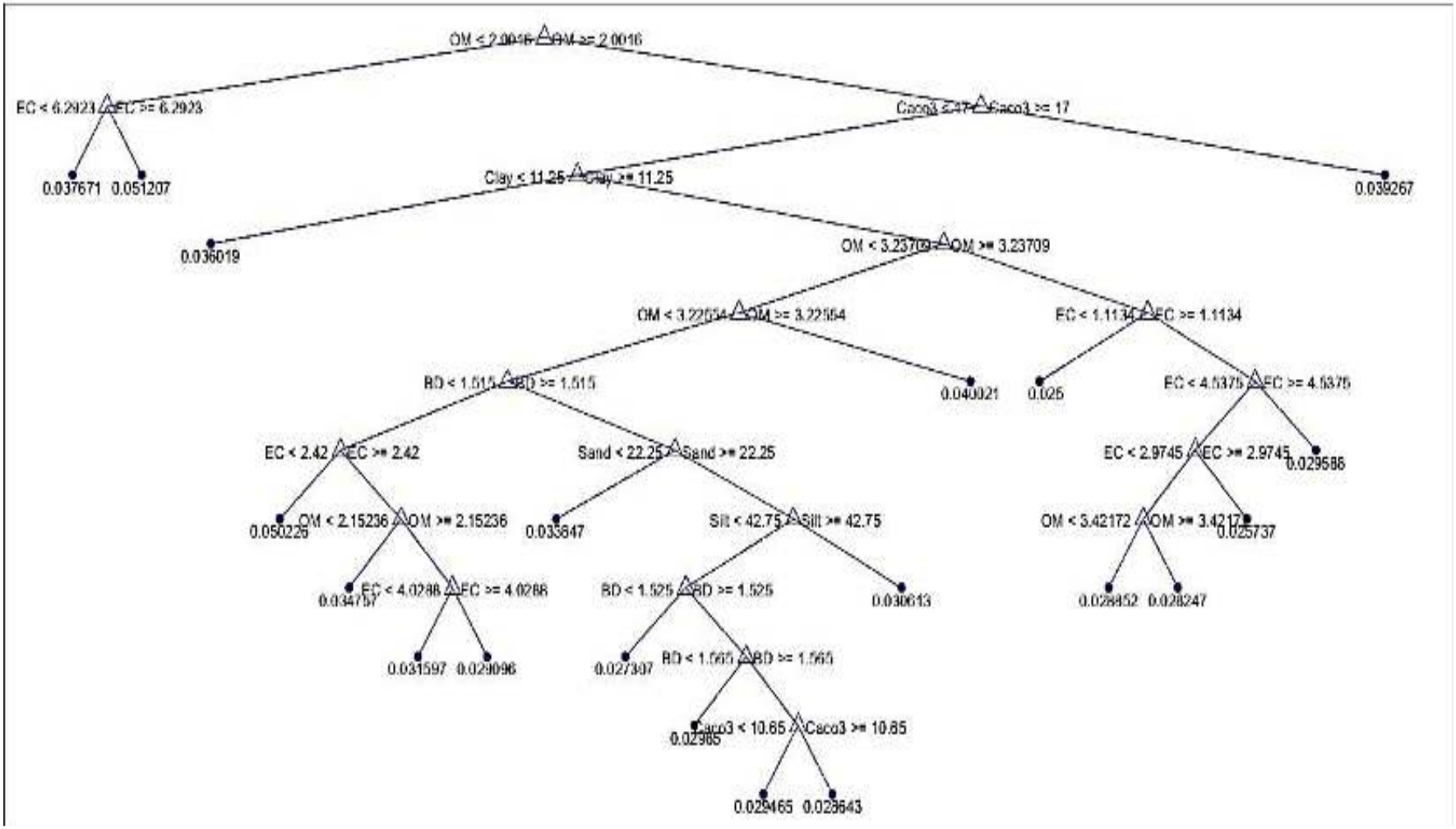
در کاربری‌های مختلف از نظر چگالی ظاهری تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد اما بیشترین چگالی ظاهری مربوط به کاربری زراعت و کمترین مربوط به کاربری نخل است.

زیاد بودن چگالی ظاهری در کاربری زراعت می‌تواند به این دلیل باشد که در این کاربری میزان ماده آلی کمتر از دو کاربری دیگر بوده است. و همچنین میزان رس و سیلت نیز در این کاربری کمتر از کاربری مرکبات می‌باشد. این نتایج بیانگر آن است که عملیات کشت و کار و خاکورزی پس از تغییر کاربری جنگل، سبب افزایش معنی‌دار جرم مخصوص ظاهری در اراضی زراعی و باغ شده است که با نتایج سلیک و همکاران (*2005*) در ترکیه و بهرامی و همکاران (*2010*) در شمال ایران مطابقت دارد.

بافت خاک یکی از خصوصیات فیزیکی پایدار خاک است و بر روی سایر خواص خاک مانند چگالی ظاهری خاک، ذخیره رطوبتی خاک، ساختمان خاک، نفوذپذیری خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی، درصد رطوبت اشباع و مقدار ماده آلی خاک تأثیر می‌گذارد. مطابق جدول *2* تغییر کاربری منجر به تغییراتی در میانگین اجزای تشکیل‌دهنده بافت خاک بخصوص شن و رس شده است اما این تغییرات گرچه معنی دار بوده تأثیری در تغییر کلاس بافت نداشته است؛ هر چند به‌نظر می‌رسد که این پدیده شاید در درازمدت باعث تغییر کلاس بافتی این خاک‌ها شود. تحقیقات نشان می‌دهد که بافت خاک حساسیت کمی به تغییرات مدیریت دارد (کی، *1990*). مفیدی و همکاران (*2012*) نیز بیان نمودند که تغییرکاربری سبب تغییر کلاس بافت خاک نمی‌شود. لذا علت و چگونگی اثر کاربری روی درصد شن و رس در این مطالعه به صورت قطعی مشخص نیست.

در ساختار درخت تصمیم (شکل *1*) انشعابات بالاتر بیانگر اهمیت بیش‌تر متغیر ورودی در مدلسازی است. متغیری در گروهبندی داده ها اهمیت بالاتری دارد که در نهایت به کمترین ناخالصی برسد به این معنی که متغیر مورد نظر می‌تواند تفکیک بیشتر و خالص تری در داده ها داشته و اثر بیشتری روی متغیر هدف ایجاد کند در درخت باینری دو انشعابی الگوریتم‌های مدل برای هر متغیر، نقاط گره متفاوتی را تعیین می‌کند و از میان این گره ها گرهی که در نهایت شاخه‌های فرزندان را به خلوص بهتری برساند انتخاب می شود.

نتایج مدل‌سازی رطوبت بهینه توسط الگوریتم درخت تصمیم (شکل *1*) نشان داد که متغیر ماده آلی مهم‌ترین متغیر تأثیرگذار بر رطوبت بهینه است که در اولین گره، نمونه‌ها را به دو گروه با مواد آلی کوچکتر از *2/0016* و نمونه‌های با مواد آلی بزرگتر و مساوی *2/0016* تقسیم نموده است و در طبقه بندی در بالاترین قسمت الگوریتم، یعنی در گره ریشه قرار دارد. پس از ماده آلی، درصد کربنات کلسیم معادل و هدایت الکتریکی پارامترهای اثرگذار بر رطوبت بهینه می‌باشند. اوبور و همکاران (*2018*) در مطالعه خود رابطه خطی مثبتی بین مقدار ماده آلی خاک و محدوده رطوبت بهینه خاک گزارش کردند این در حالی است که ثروتی و همکاران(*1399*) در بررسی کارایی مدل الخلافه در تخمین رطوبت بهینه خاکورزی گزارش کردند که ماده آلی همبستگی کمی با رطوبت بهینه خاکورزی دارد. مصری و همکاران (*399*)) نیز منحنی مشخصه رطوبتی خاک را بیش تر تحت تأثیر کمیت های رطوبت اشباع، ماده آلی، میانگین وزنی قطر خاکدانه معرفی کردند. در این مطالعه معیارهای ارزیابی در مدلسازی شامل ضریب تبیین، جذر میانگین مربعات خطا و درصد میانگین مربعات خطا در نظر گرفته شد.



شکل *1*- الگوریتم درخت تصمیم رطوبت بهینه خاکورزی به روش رگرسیونی

بررسی عملکرد مدل نشان داد که ضریب تبیین برای رطوبت بهینه خاکورزی *0/75* بود که اعتبار مناسب درخت تصمیم را در مدل سازی نشان می‌دهد. مقدار آماره *RMSE* همواره مثبت بوده و هر چه به صفر نزدیکتر باشد بهتر است. در مطالعه حاضر مقدار این شاخص *0/005* (معادل *0/5* درصد رطوبت وزنی) به دست آمده است. مناسبترین مدل تخمین، مدلی است که کمترین *NRMSE* را داشته باشد. به عبارت دیگر مقدار *NRMSE* بین صفر تا یک متغیر است که هرچه این مقدار به صفر نزدیکتر باشد، درستی تخمین مدل بیشتر است (اویانگ و همکاران، *2004*). مقادیر کمتر از *0/1* برای آماره *NRMSE* نشان دهندهٔ دقت عالی مدل و بازه های *0/1* تا *0/2*، *0/2* تا *0/3* و بیش از *0/3* به‌ترتیب نشان دهندهٔ دقت خوب، متوسط و ضعیف است (نیسی و همکاران، *1402*). همان طور که در جدول *6* مشاهده می‌شود، در این پژوهش مقدار *NRMSE* نشان‌دهنده توانائی عالی مدل در تخمین است. به طور کلی نتایج نشان داد که استفاده از مدل درخت تصمیم برای پیش‌بینی رطوبت بهینه به روش رگرسیون مناسب می‌باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد کاربری اراضی تأثیری بر خصوصیات رطوبتی خاک (رطوبت بهینه، مکش و دامنه رطوبت بهینه) نداشته و استفاده از درخت تصمیم برای پیش‌بینی رطوبت بهینه به دلیل دارا بودن خطای تخمین کمتر ضریب تبیین بالا، منطقی و قابل قبول است. هم‌چنین نتایج مدل‌سازی رطوبت بهینه در شکل *1* نشان داد که ماده آلی مهم‌ترین متغیر تأثیرگذار در پیش‌بینی رطوبت بهینه بوده و پس از آن به ترتیب متغیرهای درصد کربنات کلسیم معادل، هدایت الکتریکی، بافت خاک و چگالی ظاهری اهمیت دارند.

فهرست منابع:

1. بنایی، ح. م. *1380*. نقشه‌ی منابع و استعداد خاک‌های ایران. مؤسسه‌ی تحقیقات خاک و آب کشور. تهران، ایران.
2. تقی پور، م.، یغماییان مهابادی، ن. و م. شعلان پور شهرستانی. *1398*. اثر تغییر کاربری اراضی بر میزان کربن آلی خاک در
3. منطقه توتکابن استان گیلان. نشریه پژوهشهای خاک (علوم خاک و آب). *33(4)*: *590-577*.
4. ثروتی، م.، بیرامی، ح. و ا. احمدی. *1399*. ارزیابی کارایی مدل الخلافه در تخمین رطوبت بهینه خاکورزی و شاخص میرایی خاک. نشریه علوم آب و خاک. *24(1)*:*186-159*.
5. حقوردی، ا.، قهرمان، ب.، خشنود یزدی، ع.ا. و ز. عربی. *1389*. برآوردرطوبت در نقطه پژمردگی دائم و ظرفیت زراعی
6. خاک های شمال و شمال شرق ایران با استفاده از روش‌های نزدیک ترین *K* همسایه و شبکه های عصبی مصنوعی. نشریه آب و خاک. *24(4)*: *814-804*.
7. رضایی‌نژاد، ر.، ابطحی، ع.، زین‌الدینی، ع.، زارع، س. و س. شاه‌نظری. *1390*. تاثیر تغییر کاربری اراضی بر برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک. دوازدهمین کنگره علوم خاک ایران. *12-14* شهریور. دانشگاه تبریز. ایران.
8. سازمان جغرافیایی و وزارت دفاع و پشتیبانی نیروهای مسلح. *1382*. فرهنگ جغرافیای آبادی‌های استان کرمان، شهرستان جیرفت، جلد *5*، صفحه‌ی *3*.
9. شیران پور، ب.، بهرامی، ا. و م. شعبانپور. *1391*. تأثیر تغییر کاربری جنگل به باغ چای بر حاصلخیزی خاک در استان گیلان. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). *26(4)*: *831-826*.

10. شیرانی، ح.، اصغری نژاد، ن.، صدر، س.، اسفندیارپور، ع. و ح. شکفته. *1400*. تخمین مقاومت کششی خاک با استفاده از روش‌های مختلف مدل‌سازی و تخمینگرهای خطا در برخی از اراضی پسته‌کاری رفسنجان . نشریه علمی پژوهش‌های خاک. *35(3)*: *320-303*.

11. شیرانی، ح. *1396*. شبکه های عصبی مصنوعی با رویکرد کاربرد در علوم کشاورزی و منابع طبیعی. انتشارات دانشگاه ولی عصر رفسنجان. *360* صفحه.

12. شهرابی، ج. *1392*. داده کاوی *2*. انتشارات جهاد دانشگاهی (دانشگاه صنعتی امیرکبیر).

13. غلامی، ل. داوری، م. نبی الهی، ک. و ح. جنیدی جعفری. *1395*. تاثیر تغییر کاربری اراضی بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک (مطالعه موردی: بانه). حفاظت منابع آب و خاک. *5(3)*: *27-13*.

14. نیک نهاد، ح. و م. مارامایی، *1390*. اثر تغییر کاربری اراضی بر خصوصیات خاک حوضه آبخیز کیچک. مجله مدیریت خاک و تولید پایدار. *1*،*(2)*: *81* تا *96*.

15. مهدوی فر، ع. قربانی، ش. مصدقی، م.ر. و م.ح. صالحی.*1392*. برآوردرطوبت بهینه خاک برای خاک ورزی بااستفاده از ویژگی‌های زودیافت درخاک های ورتی سول،دومین همایش ملی توسعه پایدارکشاورزی ومحیط زیست سالم، همدان،

16. نیسی، ک.، اگدرنژاد، ا.، و ف. عباسی.*1402*. ارزیابی مدل *AquaCrop* برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت و بهره‌وری آب تحت مدیریت مختلف کاربرد کود نیتروژن در کرج. مدلسازی و مدیریت آب و خاک. *3(1)*: *41-26*.

17. نادری، ر. ، یزدانی، ع. و ا. بیژن زاده. *1392*،تاثیر روش های خاکورزی بر پویایی جمعیت علف های هرز در باغ های مرکبات، همایش ملی پدافند غیر عامل در بخش کشاورزی، *30* آبان، قشم.

18. لطیفیان, م. *1395*. مروری بر مدیریت تلفیقی آفات نخل خرما (چالش‌ها و راه‌کارها. فصلنامه تخصصی تحقیقات حشره شناسی. *8(4)*: *287-271*.

19. *Allmaras, R.R., Burwell, R.E., and R.F. Holt. 1969. Plow-layer porosity and surface roughness from tillage as affected by initial porosity and soil moisture at tillage time. Soil Sci. Soc. Am. J. 31: 550–556.*

20. *Bouyoucos, G.J. 1951. A recalibration of hydrometer method for making mechanical analysis of soil. Agronomy. 43: 434-438.*

21. *Bahrami, A., Emadodin, I., Ranjbar-Atashi, M. and H. Rudolf-Bork. 2010. Land use change and soil degradation: A case study, north of Iran. Agr Biol J N Am, 1(4): 600-605.*

22. *Berntsen, R., and B. Berre. 2002. Soil fragmentation and the efficiency of tillage implements. Soil Till Res. 64: 137–147.*

23. *Celik, I. 2005. Land-use effects on organic matter and physical properties of soil in a southern mediterranean highland of Turkey. Soil Till Res. 83: 270-277.*

24. *Dexter, A.R., and N.R.A. Bird. 2001. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. Soil Till Res. 57: 203–212.*

25. *Dexter, A.R., Czyz, E.A., Birkas, M., Diaz-Pereira, E., Dumitru, E., Enache, R., Fleige, H., Horn, R., Rajkaj, K., de la Rosa, D. and C. Simota. 2005. SIDASS project Part 3, The optimum and the range of water content for tillage - further developments. Soil Till Res. 82: 29-37.*

26. *Dexter, A.R., and N.R.A, Bird. 2011. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. Soil Till Res. 57: 203-212.*

27. *Diaz-Zorita, M., Grove, J.H. and E. Perfect. 2002. Disruptive methods for assessing soil aggregation: a review. Soil Till Res. 64: 3-22*
28. *Greacen, E.L. 1960.Water content and soil strength. J. soil sci. 11: 313–333.*
29. *Jones, J.B. 2001. Laboratory Guides for Conducting Soil Tests and Plant Analysis. CRC Press, Boca Raton.*
30. *Kay, B.D. 2000 Soil Structure. p. 271-278. In E.M. Sumner (ed.) Handbook of Soil Science. CRC Press, Boca Raton London, New York, Washington, D.C.*
31. *Loghavi, M. and A. Moradi, 1996. Draft and draw bar power reguirement of moldboard plow in a clay loam soil. Iran Agricultural Research, 15 (2): 203-214*
32. *Moncada, M.P., Gabriels, D., and W.M. Cornelis. 2014. Data-driven analysis of soil quality indicators using limited data. Geoderma. 235: 271-278.*
33. *Mofidi, M., Rashtbari, M., Abbaspour, H., Ebadi, A., Sheidai, E., and J. Motamedi. 2012 Impact of grazing on chemical, physical and biological properties of soils in the mountain rangelands of Sahand, Iran. Rangeland J. 34: 297-303.*
34. *Mosaddeghi, M.R., Morshedizad, M., Mahboubi, A.A., Dexter, A.R., and R. Schulin. 2009. Laboratory evaluation of a model for soil crumbling for prediction of the optimum soil water content for tillage. Soil Till Res. 105: 242-250*
35. *Nelson, D.W., and L.E. Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter: laboratory methods. P. 961-1010 In D.L. Sparks (ed.) Methods of Soil Analysis. Part 3. Soil Sci. Soc. Am. J. Madison, Wisconsin.*
36. *Nemes, A., Rawls, W.J., and Y.A Pachepsky. 2006. Use of the nonparametric nearest neighbor approach to estimate soil hydraulic properties. Soil Sci. Soc. Am. J. 70: 2. 327-336.*
37. *Obour, P.B., Jensen, J.L., Lamandé, M., Watts, C.W.. and L.J. Munkholm. 2018. Soil organic matter widens the range of water contents for tillage. Soil Till Res. 182: 57-65.*
38. *Ouyang, M., Welsh, W.J., and P. Georgopoulos 2004. Gaussian mixture clustering and imputation of microarray data, J. Bioinform. 20: 917-923.*
39. *Quinlan, J.R. 1996. Improved use of continuous attributes in $C_{4.5}$. J Artif Intell Res. 4: 77-90.*
40. *Richards, L.A. 1954. Diagnosis and Improvement of Saline-Alkali Soils. U.S.D.A. Hand book, 60. Washington, D.C., U.S.A.*
41. *Shcherbakov, M.V., Brebels, A., Shcherbakova, N.L., Tyukov, A.P., Janovsky, T.A., and Kamaev, V.A. 2013. A Survey of Forecast Error Measures. World Applied Sciences Journal, 24: 171-176.*
42. *Van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44: 892–898.*
43. *Witten, I.H., Frank, E., and M.A. Hall. 2005. Data mining Practical machine learning tools and techniques. Morgan Kaufmann Publishers is an imprint of Elsevier.*
44. *Wilding, L.P. 1985. Spatial variability: Its documentation, accommodation and implication to soil surveys. p. 166-187. In: D.R. Nielsen and J. Bouma (ed.). Soil Spatial Variability.Workshop of the ISSS and the SSA, Las Vegas PUDOC, Wageningen. 30 November-1 December.*
45. *Yasrebi, J.A., Saffari, M.A., Fathi, H.A., Karimiyan, N.A., Emadi, M.O., and M.A. Baghernejad. 2008. Spatial variability of soil fertility properties for precision agriculture in Southern J Appl Sci. 8: 1642-1650.*
46. *Yohaness, Y. 1999. Classification and Regression Tree: an Introduction. Research Institute of Washington, D.C.*

Investigating the Effect of Different Agricultural Land Uses on the Optimal Water Content for Tillage Using Decision Tree Model in Jiroft Plain

H. Shirani, F. Ramezani, S. Sadr[1], and I. Esfandiarpour

Professor, Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, Vali-e-Asr University, Rafsanjan, Iran.; E-mail: shirani@vru.ac.ir

MSc Graduate, Vali-e-Asr University of Rafsanjan; E-mail: F-ramezani@yahoo.com

Assistant Professor of Agriculture, Payame Noor University, Kerman Province, Rafsanjan Center; E-mail: Ssadr@pnu.ac.ir

Professor, Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, Vali-e-Asr University, Rafsanjan; E-mail: esfandiarpoor@vru.ac.ir

Received: March,2022-, and Accepted: February, 2023

Abstract

Optimum soil water content (OSWC) for tillage is the moisture at which, if tillage is done, the maximum amount of crushing (friability) is created in the soil with minimum energy consumption. The purpose of this research was to determine the OSWC for tillage operations under different agricultural land uses in Jiroft Plain, Iran, and to evaluate the effectiveness of the decision tree model in this regard for the region. For this purpose, soil samples (90 samples) were taken intact from 0 to 20 cm depth and some of its physical and chemical characteristics were determined. To determine the soil water characteristics curve, the soil water contents at matric suctions of 10, 30, 50, 100, 300, 500, 1000 and 1500 kPa were measured using a pressure plate device. The results showed that the type of cultivation did not have a significant effect on the physical and chemical characteristics of the soil, including the optimum weighted humidity. OSWC prediction was done with decision tree. In this research, three prediction accuracy criteria, namely, coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), and normalized root mean square error (NRSME) were used to evaluate the model performance. The results showed that use of decision tree for predicting the OSWC was appropriate due to having a lower NRMSE (0.017) and a high R^2 (0.75). Also, the results of OSWC modeling showed organic matter as the most influencing variable, followed by the equivalent calcium carbonate percentage, electrical conductivity, apparent density, and percentage of sand and silt.

***Keywords**: Soil Water Characteristic Curve, Inflection point, Decision tree regression, Soil tillage*

[1] *Corresponding author: E-mail: Ssadr@pnu.ac.ir*