



## استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع از ویژگی‌های زودیافت خاک

\*فهیمة نصرتی‌کاریزک<sup>۱</sup>، سیدعلیرضا موحدی‌نائینی<sup>۲</sup>، ابوطالب هزارجریبی<sup>۳</sup>،  
قربانعلی روشنی<sup>۴</sup> و امیراحمد دهقانی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد گروه خاکشناسی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان،  
<sup>۲</sup>دانشیار گروه خاکشناسی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان،  
<sup>۳</sup>استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان،  
<sup>۴</sup>استادیار مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی گلستان  
تاریخ دریافت: ۹۰/۷/۲؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۲/۱۸

### چکیده

هدایت هیدرولیکی اشباع خاک از مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی خاک است که اهمیتی ویژه در شناخت، بررسی و مدل‌سازی ترابری آب، املاح و آلاینده‌ها در محیط‌های متخلخل دارد. با وجود پژوهش‌های پرشمار که پیرامون اندازه‌گیری مستقیم هدایت هیدرولیکی اشباع صورت گرفته است، این روش‌ها هم‌چنان پرهزینه، زمان‌بر و تخصصی هستند. از این‌رو، برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از روش‌هایی سریع، کم‌هزینه و با دقتی قابل قبول از جمله توابع انتقالی خاک، ضروری است. هدف از این پژوهش برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از پارامترهای زودیافت خاک شامل توزیع اندازه ذرات، جرم ویژه ظاهری، تخلخل کل، تخلخل مؤثر، درصد رطوبت در مکش ۰/۳ و ۱۵ بار، درصد آهک، درصد مواد آلی، pH و EC با بهره‌گیری از شبکه عصبی مصنوعی بود. به این منظور، در منطقه چهل‌دین در محدوده شهرستان گرگان هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از دستگاه نفوذسنج گوالف در ۲۷ مکان در عمق‌های ۱۰-۳۵، ۱۵-۳۵ و ۲۰-۳۵ (۸۱ = ۳ × ۲۷) اندازه‌گیری و از همان نقاط نمونه‌برداری خاک نیز صورت گرفت. سپس ویژگی‌های زودیافت خاک، در آزمایشگاه اندازه‌گیری و نتایج اولیه به دست آمد. بر پایه نتایج تجزیه حساسیت، درصد شن و رس، درصد رطوبت در مکش ۰/۳ بار، تخلخل کل و میانگین هندسی اندازه ذرات به ترتیب به عنوان پارامترهای حساس در برآورد هدایت

\* مسئول مکاتبه: [nosrati.f@gmail.com](mailto:nosrati.f@gmail.com)

هیدرولیکی اشباع بودند. در نهایت به منظور تخمین سریع و کم هزینه هدایت هیدرولیکی اشباع، با استفاده از پارامترهای حساس، مدل‌هایی گوناگون طراحی شدند. نتایج نهایی مقایسه مدل‌ها نشان داد که بهترین مدل از نظر دقت و سرعت تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع مدلی بود که از پارامترهای ورودی لگاریتم میانگین هندسی قطر ذرات، تخلخل کل و درصد شن و رس استفاده شد.

**واژه‌های کلیدی:** تجزیه حساسیت، شبکه عصبی مصنوعی، نفوذسنج گوالف، هدایت هیدرولیکی اشباع

### مقدمه

رابطه هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک: هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ( $K_s$ )<sup>۱</sup>، از مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی خاک است که اهمیتی ویژه در شناخت، بررسی و مدل‌سازی ترابری آب، املاح و آلاینده‌های محیط متخلخل زیرزمینی دارد. مقادیر متفاوت ذرات رس، سیلت و شن همراه با مواد آلی و آهک از عوامل تشکیل‌دهنده ساختمان خاک و ایجاد خاک‌دانه در خاک می‌باشند (عالمی، ۱۹۸۱). با بهبود وضعیت ساختمان خاک، اندازه خاک‌دانه‌ها بزرگ‌تر می‌شود. افزایش اندازه خاک‌دانه، باعث افزایش حجم منافذ ریز درون خاک‌دانه‌ای، کاهش جرم ویژه ظاهری خاک و افزایش میزان حجم آب در رطوبت‌های بالا مثل رطوبت در مکش  $0/3$  بار<sup>۲</sup> و در نتیجه باعث افزایش حرکت آب در خاک می‌شود. بنابراین هدایت هیدرولیکی خاک به‌طور مستقیم و غیرمستقیم تحت‌تأثیر ساختمان خاک، بافت خاک، مواد آلی، درصد آهک، جرم ویژه ظاهری، رطوبت در مکش  $0/3$  بار و تخلخل کل خاک است (عالمی، ۱۹۸۱). همچنین هدایت هیدرولیکی به توزیع اندازه خلل و فرج هدایت‌کننده آب بستگی دارد، به‌طوری‌که در حالت اشباع تمامی خلل و فرج در هدایت آب نقش دارند. لازم به ذکر است که اندازه و شکل ذرات خاک تعیین‌کننده فضای خالی در خاک می‌باشد (عالمی، ۱۹۸۱).

مدل‌سازی هدایت هیدرولیکی اشباع با پارامترهای زودیافت خاک: برخی از قوانین و پدیده‌های حاکم در محیط متخلخل خاک که در شاخه‌های مختلف علوم خاک مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد به خصوصیات این محیط دینامیک و پویا باز می‌گردد. از مهم‌ترین خصوصیات هیدرولیکی خاک، می‌توان به هدایت هیدرولیکی و منحنی نگهداشت رطوبتی اشاره نمود. اکثر مدل‌های شبیه‌ساز

1- Saturated Hydraulic Conductivity ( $K_s$ )

2- Field Capacity

حرکت آب و انتقال املاح، این خصوصیات را به عنوان ورودی‌های مورد نیاز خود دریافت می‌نمایند. از یک سو اندازه‌گیری مستقیم این خصوصیات به طور معمول با صرف زمان و هزینه بسیار همراه است و از طرفی دیگر این خصوصیات دارای تغییرات زمانی و مکانی به نسبت قابل توجهی بوده و به روش اندازه‌گیری نیز وابسته‌اند. این موارد محققان علوم خاک را مجاب به استفاده از روش‌های غیرمستقیم نموده است. یکی از این روش‌های غیرمستقیم توابع انتقالی خاک (PTFs) نامیده می‌شود. در زمینه بسط و توسعه توابع انتقالی نیز به طور معمول از روش‌های رگرسیون خطی و غیرخطی کلاسیک و در سال‌های اخیر از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی سود برده می‌شود. مطالعات متعددی در رابطه با مدل‌سازی هدایت هیدرولیکی اشباع با شبکه عصبی مصنوعی انجام شده است که در زیر به آن اشاره می‌شود (موذن‌زاده و همکاران، ۲۰۰۹).

شاپ و لیچ (۱۹۹۸) هدایت هیدرولیکی اشباع، غیراشباع و منحنی رطوبتی خاک را با استفاده از پارامترهای توزیع اندازه ذرات، جرم ویژه ظاهری خاک و درصد رطوبت در مکش  $0/3$  بار برآورد کردند. آن‌ها در این بررسی، ۴ مدل با ورودی‌های زیر انتخاب کردند. مدل (۱) شامل درصد شن، سیلت و رس، مدل (۲) شامل درصد شن، سیلت، رس و جرم ویژه ظاهری، مدل (۳) شامل درصد شن، سیلت، رس، جرم ویژه ظاهری و درصد رطوبت در مکش  $0/3$  بار و مدل (۴) شامل درصد شن، سیلت، رس، جرم ویژه ظاهری و درصد رطوبت در مکش  $0/3$  و  $0/1$  بار بود. نتایج این بررسی نشان داد که روند کاهش شاخص ریشه میانگین مربعات باقی‌مانده (RMSE)<sup>۱</sup> از مدل (۱) تا مدل (۳) چشم‌گیرتر از روند کاهش RMSE از مدل (۳) تا مدل (۴) است. به عبارت دیگر افزودن جرم ویژه ظاهری یا یک نقطه از منحنی رطوبتی به مدل ۱ نقش بیش‌تری در کاهش RMSE دارد. شاپ و همکاران (۱۹۹۸) ۱۹ مدل شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از پارامترهای درصد شن، سیلت و رس، جرم ویژه ظاهری، تخلخل کل، درصد سنگ‌ریزه، افق خاک و نقاط منحنی رطوبتی ایجاد کردند. در جزییات این بررسی، از بین ۱۹ مدل شبکه عصبی مصنوعی ۴ مدل با ورودی‌های مختلف انتخاب گردید (مدل ۱: کلاس بافتی خاک، مدل ۲: درصد شن، سیلت و رس، مدل ۳: درصد شن، سیلت، رس و جرم ویژه ظاهری و مدل ۴: پارامترهای مدل قبل و درصد رطوبت در مکش  $0/3$  بار). کاهش RMSE از  $0/627$  برای اولین مدل،  $0/602$  برای دومین مدل،  $0/533$  برای سومین مدل و  $0/451$  برای چهارمین مدل گزارش شد. پارسورامن و همکاران (۲۰۰۶)

1- Root Mean Squar Error (RMSE)

برای برآورد هدایت آبی اشباع در مقیاس مزرعه‌ای، ۲ مدل شبکه عصبی مصنوعی طراحی نمودند. پارامترهای ورودی در مدل اول درصد رس، سیلت و شن بود و در مدل دوم علاوه بر سه ویژگی یاد شده، جرم ویژه ظاهری اضافه شد. نتایج این پژوهش نشان داد که شبکه‌های عصبی طراحی شده عملکردی بهتر در برآورد هدایت آبی اشباع در مقایسه با نرم‌افزار Rosetta داشته‌اند. مردون و همکاران (۲۰۰۶) با استفاده از توابع انتقالی و شبکه‌های عصبی مصنوعی هدایت هیدرولیکی اشباع را برآورد نمودند. در این پژوهش ۱۳۰ نمونه از داده‌ها برای پی‌ریزی مدل‌ها و ۶۵ نمونه باقی‌مانده برای ارزیابی مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد مدل‌های رگرسیونی برآورد بهتری از هدایت هیدرولیکی اشباع نسبت به شبکه‌های عصبی مصنوعی داشته‌اند. با این وجود، تفاوت یاد شده در برآورد متغیرهای موردنظر از نظر آماری معنی‌دار نبوده است. نواییان و همکاران (۲۰۰۴) با شبکه عصبی مصنوعی هدایت هیدرولیکی اشباع را با استفاده از پارامترهای زودیافت خاک مدل‌سازی کردند و سپس با تجزیه حساسیت پارامترهای جرم ویژه ظاهری، تخلخل مؤثر، میانگین هندسی اندازه ذرات و انحراف معیار هندسی اندازه ذرات را به‌عنوان پارامترهای حساس معرفی کردند و ۳ مدل شبکه عصبی با استفاده از پارامترهای مؤثر شناخته شده از تجزیه حساسیت ایجاد کردند. مدل (۱) شامل پارامترهای میانگین هندسی قطر ذرات، انحراف معیار هندسی قطر ذرات و تخلخل مؤثر، مدل (۲) شامل پارامترهای جرم ویژه ظاهری، تخلخل مؤثر و میانگین هندسی قطر ذرات و مدل (۳) شامل پارامترهای انحراف معیار هندسی قطر ذرات و تخلخل مؤثر بود. دقت برآورد مدل‌های ارایه شده با معیار  $R^2=0.74$  برای مدل (۱) و  $R^2=0.7$  برای مدل (۲) و  $R^2=0.83$  برای مدل (۳) به‌دست آمد. هر سه مدل ارایه شده نسبت به دیگر مدل‌های شبکه عصبی که در مقالات دیگر منتشر شده است، دارای دقت برآوردی مناسب‌تری بودند. دعایی و همکاران (۲۰۰۵) به‌منظور تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از ۲۲۱ نمونه خاک از استان گیلان پارامترهای درصد کربن آلی، درصد شن، سیلت، رس، جرم ویژه ظاهری و هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری کردند. در این پژوهش از ۳ مدل مختلف استفاده شد. مدل (۱) شامل پارامترهای درصد شن، سیلت، رس (SSiC)، مدل (۲) شامل پارامترهای درصد رس، جرم ویژه ظاهری و ماده آلی (CBDOC) و مدل (۳) شامل پارامترهای درصد ماده آلی، درصد شن، سیلت، رس و جرم ویژه ظاهری (SSiCBDOC) بود. مقایسه بین نتیجه‌های به‌دست آمده نشان داد که اگرچه شبکه‌های عصبی با هر ۳ مدل ورودی توانسته است تخمین قابل‌قبولی از هدایت هیدرولیکی خاک ارایه دهد، ولی مدل ورودی (CBDOC) نسبت به سایر مدل‌ها دقت بیش‌تر و

خطای کمتری در تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع دارد. بنابراین با توجه به تعداد محدود پژوهش‌های مشابه انجام شده در داخل کشور و با توجه به دشواری، وقت‌گیری و هزینه‌بر بودن روش مستقیم اندازه‌گیری  $K_s$ ، هدف از انجام این پژوهش، تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از برخی پارامترهای زودیافت خاک مانند درصد ذرات مختلف خاک (رس، سیلت و شن)، میانگین هندسی قطر ذرات خاک، درصد ماده آلی، درصد آهک، جرم ویژه ظاهری و حقیقی خاک، pH و EC می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

با مطالعات اولیه روی مناطق کشاورزی استان گلستان مشاهده شد که در منطقه چهل‌دین مشکل آب‌ماندگی وجود دارد. به همین علت این منطقه به‌عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. منطقه چهل‌دین با ۱۰۰۰۰ هکتار مساحت، در محدوده یساقی تا بندرتکرمن در طول شرقی ۵۴ درجه و ۱۴ دقیقه و ۵۹ ثانیه تا ۱۱ درجه و ۴ دقیقه و ۵۴ ثانیه و عرض شمالی ۳۶ درجه و ۴۹ دقیقه و ۲۰ ثانیه تا ۳۶ درجه و ۵۳ دقیقه و ۳۴ ثانیه واقع است. هدایت هیدرولیکی اشباع ( $K_s$ ) در منطقه با استفاده از نفوذسنج گوالف اندازه‌گیری شد و از همان محل نمونه‌برداری از خاک نیز صورت گرفت. روش نفوذسنج گوالف یکی از روش‌های اندازه‌گیری نفوذپذیری تحت بار ثابت می‌باشد. رینالدز و همکاران (۱۹۸۳) این دستگاه را به گونه‌ای درست کردند، که می‌واند آب را در چاهک کوچکی در حد ثابت نگه دارد. در این روش مقادیر  $K_{fs}$ ، پتانسیل ماتریک و ضریب توانایی جذب را می‌توان به‌طور هم‌زمان اندازه‌گیری نمود. این دستگاه برای اولین بار در دانشگاه Guelph در انتاریو کانادا ابداع شده و به‌همین دلیل، به روش گوالف شهرت دارد. در این پژوهش از دستگاهی که توسط شرکت مهندسی کشاورزی فرخ‌پارس چهارمحال از روی دستگاه گوالف آمریکایی شبیه‌سازی شده بود استفاده شد. پس از آماده شدن دستگاه نفوذسنج گوالف و اطمینان از آب‌بندی آن، دستگاه توسط یک سه‌پایه مهار و بر روی چاهک به عمق ۳۵ سانتی‌متر نصب می‌شود. با بالا کشیدن لوله ورود هوا، آب مخزن از طریق لوله نگه‌دارنده وارد چاهک می‌شود و هوا از طریق لوله ورود هوا وارد مخزن شده و در بالای سطح آب قرار می‌گیرد. در اثر این فرایند تعادل برقرار می‌شود، به‌طوری‌که افت سطح آب درون چاهک بعد از بالا کشیدن لوله ورود هوا همیشه ثابت می‌ماند و فشار ستون آب درون مخزن و هوای همراه آن برابر فشار اتمسفر (فشار وارده به سطح آب درون چاهک) می‌باشد، حفظ تعادل در این دستگاه براساس اصل لوله ماریوت می‌باشد. افت سطح آب درون مخزن توسط مقیاسی که بر روی مخزن داخلی بر حسب سانتی‌متر درج شده است مشخص می‌شود. مقدار افت سطح آب در فاصله‌های زمانی معین با

توجه به بافت خاک یادداشت می‌گردد. اندازه‌گیری تا وقتی ادامه می‌یابد که در ۳ یا ۴ فاصله زمانی متوالی و مساوی میزان افت سطح آب در واحد زمان یکسان باشد. ماهیت نفوذسنج گلف به گونه‌ای است که در اندازه‌گیری  $K_s$  لایه ۱۰ سانتی متری فوقانی خاک دقت کافی ندارد، بنابراین در این پژوهش نیز در اعماق و محل‌های مختلف اندازه‌گیری  $K_s$ ، نمونه‌های خاک برای اندازه‌گیری پارامترهای زودیافت آن‌ها برداشته شد. در این پژوهش، ۷۳ نمونه خاک (هشت ست داده در طول مراحل آزمایش به دلایل مختلف از بین رفتند) از عمق‌های ۱۰-۳۵، ۱۵-۳۵، ۲۰-۳۵ سانتی متری به روش نمونه‌برداری سیستماتیک و با تنوع بافتی به نسبت مناسب از منطقه برداشت گردید. برای اندازه‌گیری پارامترهای زودیافت خاک، مقادیر فراوانی نسبی اندازه ذرات خاک به روش هیدرومتری (گی و بودر، ۱۹۸۶)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون با اسید کلریدریک نیم نرمال برای خشی‌سازی کربنات کلسیم در آن (پیچ و همکاران، ۱۹۸۲)، درصد ماده آلی (والکی و بلک، ۱۹۳۴)، جرم ویژه حقیقی به روش پیکنومتری، تعیین رطوبت خاک به روش وزنی، جرم ویژه ظاهری به روش استوانه (بلک و هارتج، ۱۹۸۶)، EC و pH آن‌ها پس از تهیه گل اشباع، با دستگاه EC متر و pH متر اندازه‌گیری شدند (پیچ و همکاران، ۱۹۸۷). همچنین، تخلخل مؤثر از رابطه ۱ به دست می‌آید (علیزاده، ۲۰۰۴). میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک طبق رابطه‌های ۲ و ۳ براساس روش ارائه شده توسط شیرازی و بورسما (۱۹۸۴) تعیین گردید (علیزاده، ۲۰۰۴).

$$\theta_e = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_s}\right) - \theta_{fc} \quad (1)$$

$$a = 0.1 \sum_{i=1}^n f_i \ln m_i \quad d_g = \exp a \quad (2)$$

$$b = \left(0.1 \sum_{i=1}^n f_i \ln^2 m_i\right) - a^2 \quad \sigma_g = \exp b \quad (3)$$

در نهایت رابطه‌های بین هدایت هیدرولیکی اشباع و پارامترهای زودیافت خاک با تجزیه شبکه عصبی مصنوعی مشخص شد. قبل از آموزش شبکه عصبی، داده‌های ورودی به آن باید استاندارد شوند. برای استاندارد کردن داده‌ها از رابطه ۴ استفاده شده است:

$$X_n = 0.5 + 0.5 \left( \frac{X - X_{mean}}{X_{max} - X_{min}} \right) \quad (4)$$

که در آن،  $X_n$ : معرف داده نرمال شده،  $X$ : معرف داده مشاهده‌ای،  $X_{mean}$ ،  $X_{min}$  و  $X_{max}$ : به ترتیب معرف داده‌های مشاهده‌ای میانگین، حداکثر و حداقل می‌باشند. سپس پارامترهای زود یافت خاک به عنوان پارامترهای ورودی و هدایت هیدرولیکی اشباع به عنوان خروجی شبکه در نظر گرفته شد. ۶۰ درصد داده‌ها (۴۵ نمونه) برای آموزش مدل، ۲۰ درصد داده‌ها (۱۴ نمونه) برای انجام فرایند اعتبارسنجی مدل و ۲۰ درصد (۱۴ نمونه) به عنوان داده‌های آزمون مدل انتخاب گردید. به منظور آموزش شبکه عصبی، نرم‌افزار Matlab7.9 شبکه MLP مورد استفاده قرار گرفت. همچنین برای دستیابی به فاکتورهای مؤثر بر هدایت هیدرولیکی اشباع از تجزیه حساسیت استفاده شد. در این پژوهش برای انجام تجزیه حساسیت مدل از ضریب بدون بعد حساسیت (هیل، ۱۹۹۸) استفاده گردید. همچنین برای ارزیابی و مقایسه عملکرد مدل‌های مختلف، از ضریب تبیین ( $R^2$ ) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) بین داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده استفاده شد. بیان ریاضی آماره RMSE به صورت رابطه ۵ می‌باشد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(a-t)^2}{N}} \quad (5)$$

که در آن،  $a$  و  $t$ : به ترتیب مقدار پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده پارامتر هدایت هیدرولیکی اشباع و  $N$ : تعداد داده‌ها است.

شبکه عصبی مصنوعی برای همه مدل‌ها، با الگوریتم آموزشی لونیبرگ-مارکوآردت به صورت یک لایه پنهان، تابع آستانه **logsig** برای لایه پنهان و **tansig** برای لایه خروجی انتخاب گردید.

## نتایج و بحث

توصیف آماری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها که مربوط به هر سه عمق ۱۰-۳۵، ۳۵-۱۵ و ۳۵-۲۰ سانتی‌متر از سطح خاک است، در جدول ۱ خلاصه شده است. در بین پارامترهای فیزیکی خاک که در جدول ۱ نشان داده است، جرم ویژه ظاهری کم‌ترین و هدایت هیدرولیکی اشباع بیش‌ترین ضریب تغییرات را دارند. این مطلب نشان می‌دهد که هدایت هیدرولیکی اشباع دارای تغییرات مکانی زیادی است و به علت این‌که به عوامل متعددی بستگی دارد، حتی در فواصل کوتاهی مقدار این پارامتر تغییر

1- Correlation Coefficient ( $R^2$ )

می‌کند (کومار و همکاران، ۱۹۹۴). از این رو پژوهشگران هدایت هیدرولیکی اشباع را با تکنیک‌های زمین آماری و روش‌های مدل‌سازی تخمین می‌زنند (قنبریان‌علویجه و همکاران، ۲۰۰۹). مقادیر ضریب چولگی ارایه شده در جدول ۱ بیانگر این مطلب است که تمامی متغیرها به‌جز پارامترهای میانگین هندسی قطر ذرات، شوری و هدایت هیدرولیکی اشباع از توزیع نرمال برخوردارند.

جدول ۱- توصیف آماری ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک‌ها از عمق‌های ۱۰-۳۵، ۱۵-۳۵ و ۲۰-۳۵.

پارامتر	واحد	حداقل	حداکثر	میانگین	ضریب تغییرات	چولگی
ماده آلی (OM درصد)	درصد	۰/۳۳	۳/۷۶	۱/۸۸	۰/۳۸	۰/۲۴
آهک (CCE درصد)	درصد	۴/۵	۳۵/۵	۱۶/۴	۰/۴۷	۰/۲۶
pH	$-\log[H^+]$	۷/۳۲	۸/۴۳	۷/۷۶	۰/۰۲	۰/۵۸
EC	$dS.m^{-1}$	۰/۴	۱۸/۷۵	۲/۵۹	۱/۳۶	۳/۰۱
رس (clay)	درصد	۱/۶۵	۵۵/۳۱	۲۶/۷۲	۰/۵	۰/۰۹
سیلت (silt)	درصد	۶/۵	۶۴/۷۱	۴۳	۰/۳۵	-۰/۸
شن (sand)	درصد	۲/۵	۹۰/۵	۳۲/۶۵	۰/۷۷	۰/۷
رطوبت در مکش ۰/۳ بار ( $\theta_{.۳}$ )	درصد	۰/۱۱	۰/۳۹	۰/۲۸	۰/۲	-۰/۷
میانگین هندسی قطر ذرات ( $d_g$ )	میلی‌متر	۰/۰۰۵	۰/۶۶	۰/۰۸۹	۱/۶۵	۲/۶۳
انحراف معیار هندسی ذرات ( $\sigma_g$ )	-	۳/۷۶	۱۶/۴۲	۹/۵۹	۰/۳۲	۰/۰۷
جرم ویژه ظاهری ( $\rho_b$ )	گرم بر سانتی‌متر مکعب	۰/۹۳	۱/۶۹	۱/۳۸	۰/۰۹	-۱/۰۲
هدایت هیدرولیکی اشباع ( $K_{fs}$ )	سانتی‌متر بر دقیقه	۰/۰۰۰۱۲۳	۱/۰۸۳	۰/۰۹۲۷	۲/۲۷	۲/۹۸

مدل‌سازی شبکه عصبی مصنوعی: در مدل‌سازی هدایت هیدرولیکی اشباع با ۱۴ پارامتر ورودی برای ۷۳ نمونه خاک در شبکه عصبی مصنوعی، بهترین آرایش لایه پنهان با الگوریتم آموزشی لونیگ-مارکوآردت به‌صورت یک لایه پنهان، ۴۵ نرون، تابع آستانه  $\log\text{sig}$  برای لایه پنهان و  $\text{tansig}$  برای لایه خروجی انتخاب گردید. مقادیر  $R^2$  برای مراحل آموزش، اعتبارسازی، آزمون و کل به‌ترتیب برابر ۰/۹۴۴، ۰/۸۵۵، ۰/۸۰۷ و ۰/۸۸۴ و مقادیر RMSE برای مراحل آموزش، اعتبارسازی، آزمون و کل به‌ترتیب برابر ۰/۰۰۳۳، ۰/۰۱۳، ۰/۰۱۴ و ۰/۰۰۴۲ می‌باشد. بالا بودن مقادیر  $R^2$  و پایین بودن مقادیر



RMSE یاد شده بیانگر نزدیک بودن داده‌های پیش‌بینی با داده‌های اندازه‌گیری و دقت بالای مدل در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع است.

**تجزیه حساسیت:** بعد از مدل‌سازی هدایت هیدرولیکی اشباع با ۱۴ پارامتر به‌وسیله شبکه عصبی مصنوعی و به‌دست آوردن بهترین شبکه از نظر پارامترهای آماری، برای به‌دست آوردن حساس‌ترین پارامترها، تجزیه حساسیت به روش ضریب بدون بعد حساسیت (هیل، ۱۹۹۸) انجام شد. جدول ۳ نتایج تجزیه حساسیت را نشان می‌دهد. هیل (۱۹۹۸) در پژوهش‌های خود بیان می‌کند که اگر مقدار ضریب حساسیت پارامتری از ۰/۱ بیش‌تر باشد، آن پارامتر جز پارامترهای حساس مدل محسوب می‌شود. بر طبق نتایج هیل (۱۹۹۸)، در این پژوهش، هدایت هیدرولیکی اشباع به همه پارامترها حساس می‌باشد. اما از آنجایی‌که هدف این پژوهش تخمین سریع هدایت هیدرولیکی اشباع (با حداقل تعداد آزمایش‌ها و پارامترهای موردنیاز) بود، بنابراین حساس‌ترین پارامترها در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع مشخص و با آن‌ها مدل‌سازی انجام شد. از پارامتر لگاریتم میانگین هندسی اندازه ذرات به بعد، ضریب حساسیت تغییر چندانی پیدا نکرد. از این‌رو پارامترهای درصد شن، رس، درصد رطوبت در مکش ۰/۳- بار، تخلخل کل و لگاریتم میانگین هندسی اندازه ذرات به ترتیب به‌عنوان حساس‌ترین پارامترها انتخاب گردید. بررسی نتایج به‌دست آمده از پژوهش‌ها درباره مدل‌سازی هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از پارامترهای زودیافت خاک با شبکه عصبی مصنوعی، توسط شاپ و لیچ (۱۹۹۸)، شاپ و همکاران (۱۹۹۸)، پاراسورمن و همکاران (۲۰۰۶)، نواییان و همکاران (۲۰۰۴)، دعائی و همکاران (۲۰۰۵) و قنبریان‌علویجه و همکاران (۲۰۱۰) بیانگر این است که در همه این پژوهش‌ها پارامترهای درصد رس، سیلت و شن، جرم ویژه ظاهری، درصد رطوبت در مکش ۰/۳ بار و در بعضی پژوهش‌ها پارامترهای تخلخل کل، میانگین هندسی اندازه ذرات و موادآلی به‌عنوان پارامترهای حساس به هدایت هیدرولیکی اشباع معرفی شدند. این مطلب نشان می‌دهد که نتایج به‌دست آمده از تجزیه حساسیت در این پژوهش با نتایج پژوهش‌گران پیشین هم‌خوانی داشته و گزینش پارامترهای درصد شن و رس، رطوبت در مکش ۰/۳ بار، تخلخل کل و لگاریتم میانگین هندسی قطر ذرات به‌عنوان پارامترهای حساس در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع را مورد تأیید قرار می‌دهد.

جدول ۳- نتایج تجزیه حساسیت پارامترهای زودیافت خاک.

پارامتر	ضریب حساسیت نسبی ( $\gamma$ )
Sand	۱
Clay	۰/۹۳
$\theta_{r3}$	۰/۷۱
F	۰/۵۷
Logd <sub>g</sub>	۰/۴۸
$\rho_b$	۰/۴۴
$\sigma_g$	۰/۴۲
pH	۰/۴۲
Silt	۰/۳۸
$\Phi_e$	۰/۳۷
%OM	۰/۳۲
PWP	۰/۳۲
%CCE	۰/۳۱
LogEC	۰/۲
F	۰/۵۷
Logd <sub>g</sub>	۰/۴۸
$\rho_b$	۰/۴۴
$\sigma_g$	۰/۴۲

طراحی مدل‌های مختلف شبکه عصبی مصنوعی با پارامترهای حساس: همان‌طور که از قبل اشاره شد، هدف از انجام این پژوهش برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با پارامترهای ورودی کم‌تر و در دسترس‌تر و همچنین هزینه کم‌تر بود. بنابراین با ۵ پارامتر زودیافت خاک که در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع از حساسیت بیش‌تری برخوردار بودند به‌ترتیب با افزایش تعداد پارامترهای ورودی و افزایش تعداد آزمایش انجام شده، مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی مختلفی به‌صورت جدول ۴ ایجاد شد.

جدول ۴- طراحی مدل‌های مختلف شبکه عصبی مصنوعی براساس نتیجه‌های تجزیه حساسیت و حداقل تعداد آزمایش.

تعداد آزمایش	پارامتر ورودی	مدل
۱	Sand	مدل ۱
۱	Sand+Clay	مدل ۲
۱	Sand+Clay+logd <sub>g</sub>	مدل ۳
۲	Sand+Clay+f	مدل ۴
۲	Sand+Clay+logd <sub>g</sub> +f	مدل ۵
۲	Sand+Clay+θ <sub>۰.۳</sub>	مدل ۶
۲	Sand+Clay+logd <sub>g</sub> +θ <sub>۰.۳</sub>	مدل ۷
۲	Sand+logd <sub>g</sub> +θ <sub>۰.۳</sub>	مدل ۸
۳	logd <sub>g</sub> +f+ θ <sub>۰.۳</sub>	مدل ۹
۳	Sand+Clay+logd <sub>g</sub> +f+ θ <sub>۰.۳</sub>	مدل ۱۰

در مدل‌های ۱ تا ۳ با زودیافت‌ترین پارامترها (درصد شن، رس و لگاریتم میانگین هندسی قطر ذرات) که تنها از آزمایش بافت خاک به دست می‌آیند مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی مختلفی ایجاد گردید. در مدل‌های ۴ و ۵ پارامتر تخلخل کل به پارامترهای مدل‌های ۲ و ۳ اضافه شد. آزمایش‌های انجام شده در این مدل‌ها بافت خاک و جرم ویژه ظاهری بود که شامل دو آزمایش می‌باشند. در مدل‌های ۶ و ۷ پارامتر درصد رطوبت در مکش ۰/۳ بار به پارامترهای مدل‌های ۲ و ۳ اضافه گردید. تعداد آزمایش‌های انجام شده در این مدل‌ها بافت خاک و اندازه‌گیری مکش با دستگاه صفحات فشاری است که شامل دو آزمایش می‌باشند. در مدل ۸ پارامترهای درصد رطوبت در مکش ۰/۳ بار و لگاریتم میانگین هندسی قطر ذرات به مدل ۱ اضافه می‌شود. آزمایش‌های انجام شده در این مدل بافت خاک و اندازه‌گیری مکش با دستگاه صفحات فشاری است که شامل دو آزمایش بود. در مدل ۹ با پارامترهای ورودی لگاریتم میانگین هندسی قطر ذرات، تخلخل کل و درصد رطوبت در مکش ۰/۳ بار هدایت هیدرولیکی اشباع برآورد گردید. تعداد آزمایش‌های انجام شده در این مدل‌ها بافت خاک و اندازه‌گیری مکش با دستگاه صفحات فشاری و جرم ویژه ظاهری است که شامل سه آزمایش می‌باشد. در مدل ۱۰ با پارامترهای ورودی درصد شن، درصد رس، لگاریتم میانگین هندسی قطر ذرات، تخلخل کل و درصد رطوبت در مکش ۰/۳ بار هدایت هیدرولیکی اشباع برآورد گردید. تعداد آزمایش‌های انجام شده در این مدل‌ها بافت خاک و اندازه‌گیری مکش با دستگاه صفحات فشاری و جرم ویژه ظاهری است که شامل سه آزمایش می‌باشد.

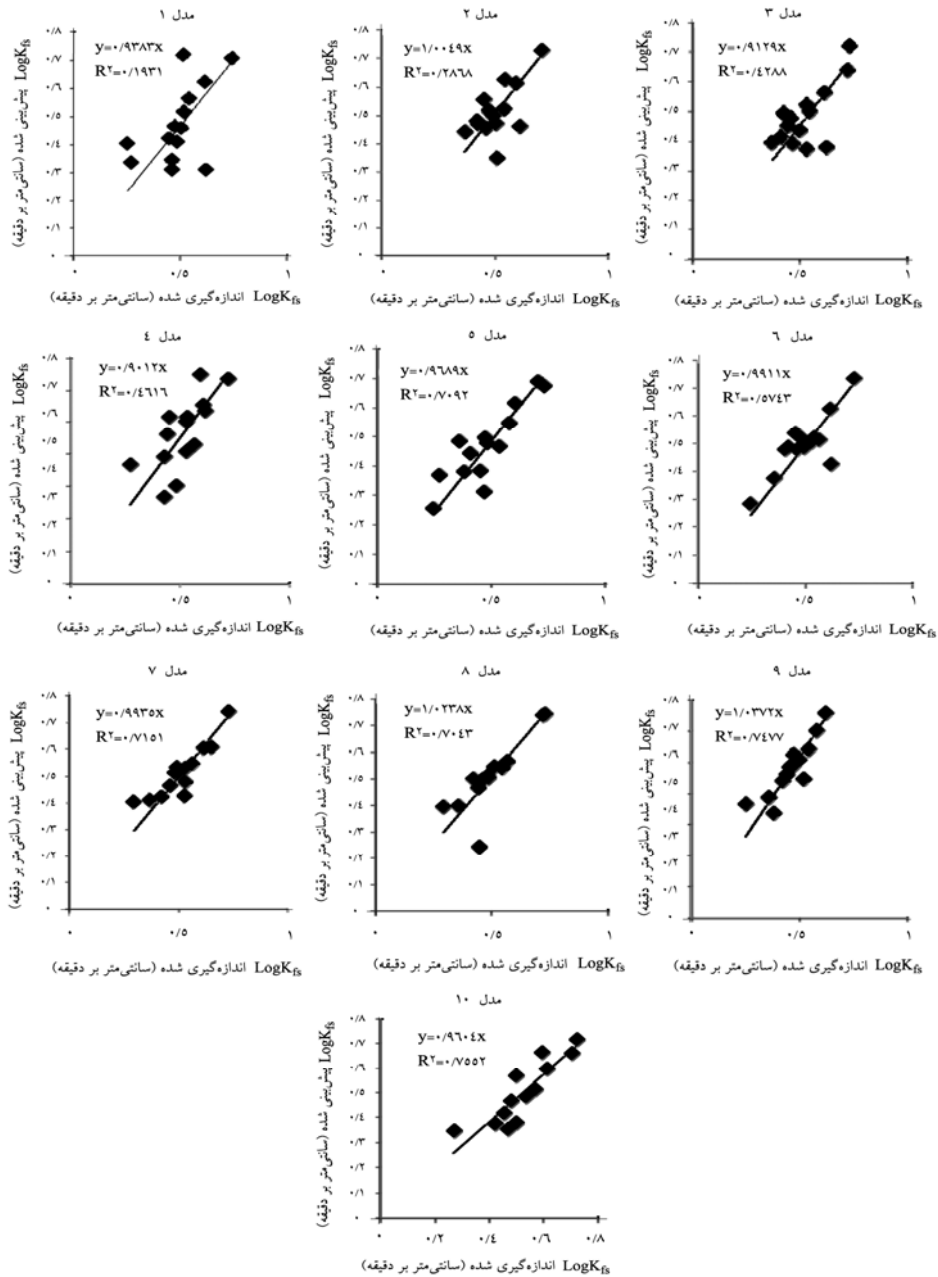
در مدل‌سازی با شبکه عصبی مصنوعی، بهترین آرایش لایه پنهان با الگوریتم آموزشی لوبنبرگ-مارکوآردت به صورت یک لایه پنهان، تابع آستانه logsig برای لایه پنهان و tansig برای لایه خروجی

انتخاب گردید. نتایج مدل‌ها در جدول ۵ آمده است. در شکل ۱ خط برازش داده شده بین داده‌های پیش‌بینی شده در مقابل داده‌های اندازه‌گیری شده هدایت هیدرولیکی اشباع در مرحله آزمون برای مدل‌های ۱ تا ۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۵- پارامترهای آماری محاسبه شده برای مراحل آموزش و آزمون.

مدل	تعداد نرون	$R^2$ آموزش	RMSE آموزش	$R^2$ آزمون	RMSE آزمون
مدل ۱	۵۰	۰/۴۸	۰/۰۶	۰/۱۹۳	۰/۱۲
مدل ۲	۵۰	۰/۵۴	۰/۰۶	۰/۲۸۷	۰/۰۸
مدل ۳	۶۰	۰/۶۰	۰/۰۵۳	۰/۴۲۸	۰/۰۷۶
مدل ۴	۴۰	۰/۷۰	۰/۰۵۲	۰/۴۶	۰/۰۹
مدل ۵	۷۰	۰/۷۵	۰/۰۴	۰/۷۰	۰/۰۶۸
مدل ۶	۳۰	۰/۷۷	۰/۰۴۸	۰/۵۷	۰/۰۶۶
مدل ۷	۳۰	۰/۸۵	۰/۰۴	۰/۷۱	۰/۰۴۸
مدل ۸	۶۰	۰/۸۸	۰/۰۳	۰/۷۰	۰/۰۷
مدل ۹	۳۰	۰/۸۴	۰/۰۴	۰/۷۴	۰/۰۴۵
مدل ۱۰	۳۰	۰/۸۴۲	۰/۰۴	۰/۷۵	۰/۰۶

مقایسه نتایج مدل‌های طراحی شده با پارامترهای حساس: بررسی نتیجه‌های جدول ۵ نشان می‌دهد که اضافه شدن پارامترهای ورودی، باعث افزایش مقدار  $R^2$  و کاهش مقدار RMSE در مراحل آموزش، اعتبارسازی و آزمون می‌شود که بیانگر بهبود دقت مدل، با افزایش تعداد پارامترهای ورودی در تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع بوده و امری کاملاً بدیهی است. این نتیجه در پژوهش‌های شاپ و همکاران (۱۹۹۸)، شاپ و لیچ (۱۹۹۸)، موذن‌زاده و همکاران (۲۰۰۹) نیز مشاهده می‌شود. مقایسه نتایج مدل‌های ۱ تا ۳ نشان می‌دهد که اگرچه بیش‌ترین  $R^2$  و کم‌ترین RMSE مربوط به مدل ۳ می‌باشد، اما با این وجود، این مدل نیز دقتی قابل قبول برای تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع ندارد. همچنین با مقایسه مدل‌های ۱ تا ۱۰ استنباط می‌شود که استفاده از پارامتر درصد رطوبت در مکش ۰/۳ بار و تخلخل کل در مدل‌های ۴ تا ۱۰ باعث افزایشی معنی‌دار در میزان  $R^2$  و در نتیجه افزایش دقت مدل می‌شود. مقایسه مدل‌های ۴ تا ۱۰ نشان می‌دهد که مدل‌های ۵، ۷، ۸، ۹ و ۱۰ با دقت قابل قبولی میزان هدایت هیدرولیکی اشباع را برآورد می‌کنند. اما از آنجایی که در مدل ۷، ۸، ۹ و ۱۰ اندازه‌گیری پارامتر درصد رطوبت در مکش ۰/۳ بار با دستگاه صفحات فشاری نسبت به تخلخل خاک هزینه‌بر، مشکل و امری زمان‌بر است، بنابراین مدل ۵ به‌علت تخمین سریع هدایت هیدرولیکی اشباع به‌عنوان مدل بهینه و برتر معرفی می‌گردد.



شکل ۱- مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه گیری شده و پیش بینی شده به وسیله شبکه عصبی مصنوعی در مرحله آزمون.

### نتیجه گیری

نتیجه‌ها نشان داد که روش شبکه عصبی مصنوعی از دقت به نسبت بالایی در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع برخوردار می‌باشد و در این ارتباط هدایت هیدرولیکی اشباع تا حد زیادی به بافت و ساختمان خاک بستگی دارد. با بهبود وضعیت ساختمان خاک، اندازه خاک‌دانه‌ها بزرگ‌تر می‌شود. افزایش اندازه خاک‌دانه، باعث افزایش حجم منافذ ریز درون خاک‌دانه‌ای، کاهش جرم ویژه ظاهری خاک و افزایش میزان حجم آب در رطوبت‌های بالا مثل رطوبت در مکش  $0/3$  بار و در نتیجه باعث افزایش حرکت آب در خاک می‌شود. بنابراین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، همان‌گونه که نتیجه‌های تجزیه حساسیت در این پژوهش نیز نشان داد به‌طور مستقیم و غیرمستقیم تحت تأثیر ساختمان خاک، بافت خاک، مواد آلی، درصد آهک، جرم ویژه ظاهری، رطوبت در مکش  $0/3$  بار و تخلخل کل خاک است. در بین پارامترهای حساس مدلی با پارامترهای ورودی درصد شن، رس، لگاریتم میانگین هندسی اندازه ذرات و تخلخل کل به‌عنوان بهترین مدل پیش‌بینی‌کننده هدایت هیدرولیکی اشباع از نظر دقت و دسترسی آسان انتخاب گردید.

نتیجه‌های به‌دست آمده در این مطالعه تنها برای منطقه مورد مطالعه و دیگر مناطق مشابه از نظر توپوگرافی، اقلیم، خاک و عملیات مدیریتی، آن هم پس از ارزیابی اعتبار توابع با داده‌های اندازه‌گیری شده از منطقه موردنظر، قابل استفاده است.

### منابع

1. Alemi, M.H. 1981. Water and soil. Tehran University Press, 346p. (In Persian)
2. Alizadeh, A. 2004. Soil physic. Astan Quds Razavi. Press, 438p. (In Persian)
3. Blake, G.R., and Hartge, K.H. 1986. Bulk density. P 363-375, In: Klute, A. (Ed), Methods of soil analysis. Part 1. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA. Madison. WI.
4. Doaei, M., Shabanpour-e-shahrestani, M., and Bagheri, F. 2005. Modelling of saturated hydraulic conductivity of Gilan Province involving Artificial Neural Networks. The Agricultural Science Research Report, Faculty of Agriculture, Gilan University, 94p. (In Persian)
5. Gee, G.W., and Bauder, J.W. 1986. Particle size analysis. P 383-411, In: Methods of soil analysis. Part 1. 2nd ed. Klute, A. (Ed). Agron. Monogr. 9. ASA. Madison. WI.
6. Ghanbarian-Alavigh, B., Liaghat, A., and Sohrabi, S. 2009. Application of Artificial Neural Networks in prediction of saturated hydraulic conductivity using soil physical parameters. J. Agric. Eng. Res. 10: 1. 97-112.

- 7.Hill, M. 1998. Methods and guidelines for effective model calibration. U.S. Geological survey Water- Resources Investigations Rep. Pp: 98-4005.
- 8.Kumar, A., Kanwar, R., and Hallberg, G. 1994. Modeling spatial variability of saturated hydraulic conductivity using Fourier series analysis. Hyd Sci. 39: 2. 143-156.
- 9.Merdun, H., Ozer, C., Meral, R., and Apan, M. 2006. Comparison of Artificial Neural Network and regression pedotransfer functions for prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity. Soil Tillage Res. 90: 108-116.
- 10.Moazen zadeh, R., Ghahraman, B., Fathalian, F., and Khoshnoodyazdi, A.A. 2009. Effect of type and number of input variables on moisture retention curve and saturated hydraulic conductivity prediction. J. Water and Soil. 23: 3. 57-70. (In Persian)
- 11.Navabian, M., Liaghat, A.M., and Homaei, M. 2004. Estimating soil saturated hydraulic conductivity using pedotransfer functions. J. Agric. Eng. Res. 4: 16. 1-11.
- 12.Page, A., Miller, R., and Keeney, D. 1982. Methods of Soil Analysis. 2<sup>th</sup> ed. Part2: Chemical and biological properties. Soil Sci. Soc. Am. Inc. Publisher.
- 13.Parasurman, K., Elshorbagy, A., and Si, B. 2006. Estimating saturated hydraulic conductivity in spatially variable fields using neural network in Ensembles. Soil Sci. Soc. Am. J. 70: 1851-1859.
- 14.Reynolds, W., Elrick, D., and Tapp, G. 1983. Areexamination of the constant head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table. Soil Sci. 136: 250-268.
- 15.Schaap, M., Leij, F., and Van Genuchten, M. 1998. Neural network analysis for hierarchical prediction of soil hydraulic properties. Soil Sci. Soc. Am. J. 62: 847-855.
- 16.Schaap, M., and Leij, F. 1998. Using neural networks to predict soil water retention and soil hydraulic conductivity. Soil and Till Res. 47: 37-42.
- 17.Shirazi, M.A., and Boersma, L. 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture. Soil Sci. Soc. Am. J. 48: 142-147.
- 18.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: 29-39.



## **Using Artificial Neural Networks to estimate saturated hydraulic conductivity from easily available soil properties**

**\*F. Nosrati Karizak<sup>1</sup>, S.A. Movahedi Naeni<sup>2</sup>, A. Hezarjaribi<sup>3</sup>,  
Gh.A. Roshani<sup>4</sup> and A.A. Dehghani<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>M.Sc. Student, Dept. of Soil Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, <sup>2</sup>Associate Prof., Dept. of Soil Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, <sup>3</sup>Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, <sup>4</sup>Assistant Prof., Golestan Agricultural and Natural Resources Research Center  
Received: 2011/09/24; Accepted: 2012/05/07

### **Abstract**

Soil saturated hydraulic conductivity is the most important physical properties that has particular importance in identifying, investigating and modeling the water, salts and pollutants transport in the porous medium. Despite numerous research, measuring saturated hydraulic conductivity with direct methods are still costly, time consuming and professional. Therefore estimating saturated hydraulic conductivity with rapid and low cost methods (pedo-transfer functions) with acceptable accuracy is essential. The purpose of this research was to estimate saturated hydraulic conductivity using easily accessible parameters such as particle size distribution, bulk density, total porosity, effective porosity, water content retained at -0.3 and -15 bar matric potentials, %CCE, %OM, pH and EC with Artificial Neural Networks. Saturated hydraulic conductivity was measured from 73 selected points at three depths (10-35, 15-35 and 20-35) with Guelph permeameter and soil samples were taken from same points. Easily accessible parameters were measured in laboratory and preliminary results were obtained. Selected parameters according to sensitivity analysis were sand and clay contents, water content at -0.3 bar matric potential, total porosity and geometric mean diameter of soil particles. Using sensitive parameters, a rapid and low cost method was selected from different designed models. Input parameters were logarithmic geometric mean diameter, total porosity, sand and clay contents with this model.

**Keywords:** Sensitivity analysis, Artificial neural network, Guelph permeameter, Saturated hydraulic conductivity

---

\* Corresponding Authors; Email: [nosrati.f@gmail.com](mailto:nosrati.f@gmail.com)