

## ارزیابی مدل‌های رگرسیونی و عصبی - فازی در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک

جواد بهمنش<sup>۱\*</sup> - الناز رضایی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۳/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۹/۸

### چکیده

مطالعه خصوصیات هیدرولیکی خاک از جمله هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در بررسی‌های زیست محیطی ضروری می‌باشد. با وجود پژوهش‌های بی‌شمار که پیرامون اندازه‌گیری مستقیم هدایت هیدرولیکی اشباع صورت گرفته است، این روش‌ها همچنان پرهزینه، زمان‌بر و تخصصی هستند. از این رو برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با استفاده از روش‌هایی سریع، کم هزینه و با دقت قابل قبول مانند توابع انتقالی خاک توسعه یافته است. هدف اصلی این تحقیق، مقایسه و ارزیابی ۱۱ تابع انتقالی رگرسیونی و سامانه استنتاج تطبیقی عصبی- فازی به منظور برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک می‌باشد. لذا آزمایشات مربوط به محاسبه هدایت هیدرولیکی اشباع و محاسبه خصوصیات فیزیکی خاک در ۴۰ نقطه از شهرستان ارومیه صورت گرفت. در هر موقعیت انتخابی، چاهکی تا عمق ۳۰ سانتی‌متر حفر گشت. هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با روش پرماتر گلف در محل هر چاهک اندازه‌گیری شد. خاک حاصل از حفر هر چاهک نیز برای تعیین ویژگی‌های زود یافت خاک در آزمایشگاه استفاده شد. نتایج نشان داد که در بین مدل‌های رگرسیونی موجود، مدل آیمرون و همکاران با کمترین مقدار خطا برای پارامترهای RMSE و MAE (۰/۱۷۴ و ۰/۰۲۸-متر در روز) بهترین برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع را در اراضی مورد مطالعه داشت. نتایج این تحقیق بر اهمیت کاربرد تخلخل مؤثر به عنوان یک پارامتر زود یافت مهم به منظور افزایش دقت توابع انتقالی رگرسیونی تأکید دارد. در شبکه استنتاج تطبیقی عصبی- فازی از میان ۵۶۱ مدل با لایه‌های ورودی مختلف، پارامترهای درصد شن، سیلت، چگالی مخصوص ظاهری و چگالی مخصوص حقیقی به عنوان ورودی انتخاب شدند. در مدل عصبی- فازی ارائه شده در این تحقیق، مقادیر  $R^2$  و RMSE در مرحله آموزش برابر با ۱ و  $1/2 \times 10^{-7}$  و در مرحله آزمون برابر با ۰/۹۸ و ۰/۰۰۶ به دست آمد. مقایسه نتایج توابع رگرسیونی و مدل‌های عصبی- فازی بیانگر برتری سامانه عصبی- فازی نسبت به تابع رگرسیونی است. همچنین سیستم استنتاج عصبی- فازی قادر است در بافت‌های خاک مختلف قدرت برآورد خود را با دقت بالا حفظ نماید.

واژه‌های کلیدی: هدایت هیدرولیکی اشباع، خصوصیات فیزیکی خاک، سامانه عصبی- فازی

### مقدمه

مشکل، روش‌های غیرمستقیم را مورد توجه قرار داده‌اند. اشتقاق توابع انتقالی خاک یکی از این روش‌هاست. توابع انتقالی توابعی هستند که ویژگی‌های زود یافت خاک، مانند پارامترهای مربوط به بافت خاک و چگالی ظاهری را به ویژگی‌های دیر یافت خاک، مانند  $K_s$  مربوط می‌نمایند.

مدل‌های ریاضیاتی با دو زیر مجموعه آماری و تجربی از متداولترین مدل‌های برآورد توابع انتقالی هستند. در آغاز، ارتباط بین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و پارامترهای زود یافت خاک با استفاده از رگرسیون خطی به عنوان زیرمجموعه‌ای از مدل‌های آماری، توسعه می‌یافت. در سال‌های اخیر مدل‌های تجربی جایگزین روش‌های قبلی شده است (۱۱ و ۱۹). مدل‌های تجربی مدلی هستند که برخلاف مدل‌های آماری، مرحله واسنجی آنها با استفاده از اطلاعات فیزیکی بر اساس تجربیات و مشاهدات قبلی به دست می‌آید. هدف استفاده از مدل‌های تجربی تهیه و تدوین ابزاری برای شبیه‌سازی روابط درونی

آگاهی از هدایت آبی اشباع خاک ( $K_s$ ) برای درک و مدل‌سازی بسیاری از فرآیندهای فیزیکی خاک است. ایجاد تمایز بین رواناب سطحی و نفوذ به درون خاک، ماندگاری موقتی آب در محیط ریشه، نرخ انتقال املاح و بسیاری دیگر از فرآیندهای کشاورزی و زیست محیطی وابسته به میزان هدایت هیدرولیکی اشباع خاک می‌باشد (۳۰). تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از روش‌های مستقیم با وجود پیشرفت‌های تکنیکی همچنان زمان‌بر و همراه با خطا می‌باشد. به علاوه، به علت تغییرات زیاد مکانی  $K_s$ ، تعیین این پارامتر به ویژه در صورت مطالعه در مقیاس وسیع مانند یک حوضه آبریز، بسیار مشکل می‌باشد (۲۱ و ۲۹). بنابراین پژوهشگران جهت حل این

۱ و ۲- دانشیار و دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه  
(\*- نویسنده مسئول: Email: j.behmanesh@urmia.ac.ir)

مدلسازی پارامترهای سیستم استنتاج فازی است، تسهیل می‌شود. در این راستا تابع ANFIS برای تخمین پارامترهای تابع عضویت از روش پس‌انتشار و یا ترکیب آن با برآورد حداقل مربعات استفاده می‌نماید. شبکه‌های عصبی مصنوعی نیز همانند روش مدلسازی فازی با استفاده از الگوهای مختلف آموزشی، انواع نگاشت‌های موجود بین متغیرهای ورودی و خروجی را تشخیص می‌دهند. لذا مجموعه‌ای از سامانه استنتاج فازی و شبکه عصبی مصنوعی، با عنوان سامانه استنتاج تطبیقی عصبی-فازی، ابزاری قدرتمند به منظور پیش‌بینی پارامترهای دیریافت خاک همچون هدایت هیدرولیکی اشباع معرفی می‌گردد (۳). نحوی‌نیا و همکاران (۵) برای تعیین متوسط میزان نفوذ در آبیاری جویچه‌ای از روش‌های رگرسیونی به عنوان یک مدل آماری و شبکه‌های عصبی مصنوعی و عصبی-فازی به عنوان مدل‌های تجربی استفاده کردند. نتایج ایشان نشان داد که دقت مدل‌های رگرسیونی در خاک‌های سنگین در مقایسه با خاک‌های متوسط و سبک بیشتر است. مدل شبکه‌های عصبی ارائه شده توسط ایشان در خاک‌های متوسط دقت مناسبی داشت. اما سیستم استنتاج عصبی فازی قادر است که توانایی برآورد را در تمام شرایط حفظ کند که این امر نشان از دقت بیشتر و قابلیت بالای این سیستم را دارد. یزدانی و همکاران (۶) هدایت هیدرولیکی اشباع خاک را با استفاده از توابع انتقالی از جمله روش‌های رگرسیونی و شبکه استنتاج تطبیقی عصبی-فازی برآورد نمودند. ایشان آزمایش‌های مربوط به هدایت هیدرولیکی اشباع و خصوصیات فیزیکی خاک را در ۵۴ نقطه با فواصل ۵ در ۵ متر انجام دادند. در تابع رگرسیونی ارائه شده توسط ایشان مقادیر ضریب تعیین ( $R^2$ )، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) به ترتیب برابر ۰/۶۵، ۰/۰۱۷ و ۰/۰۱۲ بود. شبکه استنتاج تطبیقی عصبی-فازی با ۴ لایه در ورودی شامل جرم مخصوص ظاهری، جرم مخصوص حقیقی، تخلخل و بعد فراکانتال اندازه ذرات و یک لایه خروجی دارای بهترین عملکرد بود. در مدل عصبی-فازی ارائه شده در این تحقیق مقدار  $R^2$  در آموزش و آزمون به ترتیب برابر ۰/۸۸ و ۰/۸۶ بوده و مقادیر RMSE نیز به ترتیب برابر ۰/۰۱۲ و ۰/۰۲ بودند. نتایج ایشان برتری سامانه عصبی-فازی نسبت به تابع رگرسیونی را تأیید کرد. تحقیق حاضر به منظور برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، که بیانگر بسیاری از خصوصیات خاک می‌باشد، توسط پارامترهای زودیافت فیزیکی خاک و با استفاده از مدل‌های رگرسیونی به عنوان مدل آماری و سیستم استنتاج عصبی-فازی به عنوان مدل تجربی انجام گردید.

## مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه قسمتی از دشت ارومیه در استان

و معادلات فیزیکی با استفاده از مجموعه ورودی‌ها و خروجی‌ها (مشاهدات) یک سیستم می‌باشد (۴). از آنجایی که روابط مبهم موجود در سیستم‌های طبیعی همچون خاک باعث مشاهدات غیردقیق می‌گردد، در نتیجه استفاده از مدل‌های تجربی همانند شبکه‌های عصبی مصنوعی که قابلیت تشخیص ساختار مبهم سیستم و در اختیار نهادن الگوهای مطابق با واقعیت را دارند، ضروری می‌باشد. مزیت اصلی شبکه‌های عصبی مصنوعی بر رگرسیون خطی این است که آن‌ها نیازی به تعریف رابطه بین داده‌های ورودی و خروجی ندارند (۲۶). زمانی که بیش از سه متغیر ورودی وجود داشته باشد معمولاً شبکه‌های عصبی مصنوعی بهتر از روش‌های رگرسیونی عمل می‌کند (۲۹). هان‌لی (۱۷)، با استفاده از ویژگی‌های زود یافت خاک مانند بافت خاک و درصد کربن خاک توسط دستگاه نفوذسنج دیسک به روش تخمین معکوس پارامترها، توابع انتقالی برای هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع را ارزیابی نمود. نتایج تحقیق مذکور نشان داد که تابع اسخاپ برای هدایت هیدرولیکی غیر اشباع و تابع کوسبی برای هدایت هیدرولیکی اشباع، بهترین برآورد را دارند. براکنسیک و همکاران (۱۰) از تخلخل به عنوان متغیر مستقل در تابع انتقالی خود استفاده نمودند. پاچسکی و همکاران (۲۳) با بررسی شبکه‌های عصبی و مدل‌های رگرسیونی روی ۲۳۰ نمونه خاک گزارش کردند که مدل‌های شبکه عصبی با دقت بهتر و خطای کمتری ظرفیت نگهداری آب در خاک را برآورد می‌کنند. مردون و همکاران (۲۰)، با استفاده از روش رگرسیون خطی چندگانه و شبکه‌های عصبی مصنوعی هدایت هیدرولیکی اشباع را برآورد نمودند. نتایج ایشان بیانگر توانایی بهتر مدل‌های رگرسیونی در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک نسبت به شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌باشد. با این وجود، اختلاف معنی‌داری در بین مدل‌ها مشاهده نگردید.

سامانه استنتاج تطبیقی عصبی-فازی، یک نوع از شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌باشد که در بین روش‌های نوین مدلسازی، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. این سیستم، روشی نوین در حل مسائل پیچیده‌ای است که یا الگوریتم مشخصی برای حل آن‌ها وجود ندارد و یا استفاده از روش‌های متعارف مستلزم به کارگیری راه‌حل‌های بسیار طولانی و زمان‌بر می‌باشد. یکی از قابلیت‌های مهم سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی، درک رفتار غیرخطی یک سیستم می‌باشد. این روش در سال‌های اخیر در مسائل مختلف مدیریت منابع آب و خاک مورد استفاده قرار گرفته است (۱۶). ابزار کارآمد منطق فازی، دارای امکان برقراری ارتباط بین فضای ورودی و فضای خروجی می‌باشد که ساز و کار اولیه برای انجام این کار، فهرستی از جملات اگر-آنگاه است که قانون نامیده می‌شود. جعبه ابزار منطق فازی پارامترهای تابع عضویت را طوری محاسبه می‌کند که سیستم استنتاج فازی بر مجموعه داده‌های ورودی و خروجی منطبق گردد. این محاسبات از طریق یک بردار گرادینان که معیار اندازه‌گیری برای مطلوبیت

از دستگاه صفحات فشاری، منحنی دانه‌بندی خاک با استفاده از روش الک (۱) و هیدرومتری اندازه‌گیری شد. تخلخل مؤثر خاک با استفاده از جرم ویژه ظاهری و حقیقی و رطوبت ظرفیت زراعی از رابطه ۱ محاسبه گردید. در این رابطه،  $\theta_{fc}$ ،  $\rho_b$  و  $\rho_c$  به ترتیب رطوبت خاک در ظرفیت زراعی جرم ویژه ظاهری و حقیقی خاک (گرم بر سانتیمتر مکعب) می‌باشند.

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

با استفاده از روابط پیشنهادی شیرازی و بورسما (۲۷)، میانگین هندسی ذرات ( $d_g$ ) و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک ( $\sigma_g$ ) به عنوان نمایه‌هایی از توزیع اندازه ذرات خاک به شرح زیر محاسبه شدند.

$$d_g = \exp(a), a = 0.01 \sum_{i=1}^n f_i \ln M_i \quad (2)$$

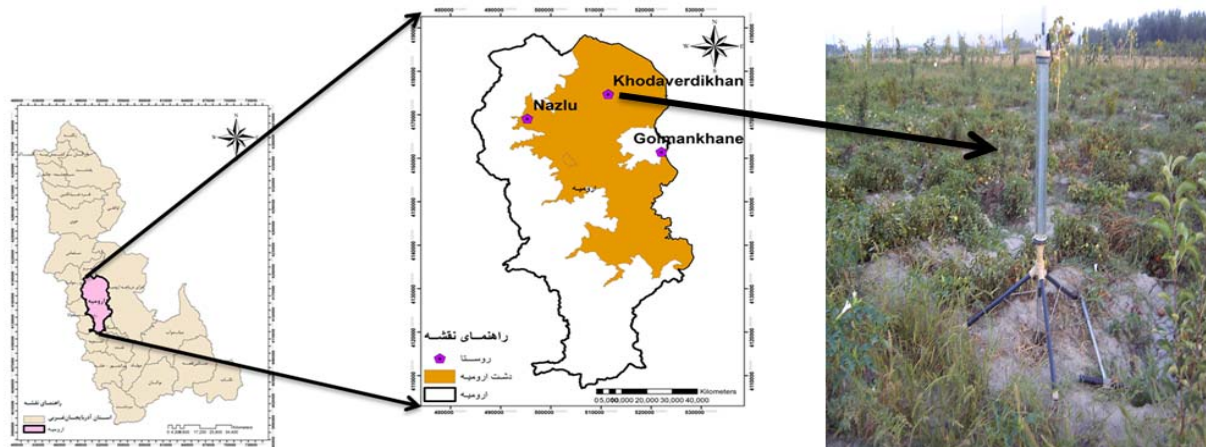
$$\sigma_g = \exp(b), b = 0.01 \sum_{i=1}^n f_i ((\ln(M_i - a^2))^2) \quad (3)$$

در روابط فوق،  $n$  تعداد محدوده ذرات خاک (رس، سیلت و شن)،  $M_i$  میانگین قطر محدوده ذرات خاک ( $mm$ )،  $f_i$  درصد محدوده ذرات خاک می‌باشد.

در سال‌های اخیر توابع انتقالی زیادی به منظور برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع ارائه شده است. تعداد ۱۱ تابع انتقالی خاک که به صورت گسترده در منابع علمی اشاره و استفاده شده است، در جدول ۱ ارائه گردیده است. آیمرون و همکاران (۸) پس از ارزیابی مدل آهوچا و همکاران (۷) و ایجاد تغییراتی در ضرایب ثابت، این مدل را با ضرایب تجربی مناسب‌تر به منظور برآوردی دقیق‌تر از هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ارائه نمودند.

آذربایجان غربی در موقعیت جغرافیایی ۴۵ درجه و ۱ دقیقه تا ۴۵ درجه و ۳۸ دقیقه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۴۲ دقیقه عرض شمالی می‌باشد که از سری خاک‌های نازلو، خداوردیخان و گلمانخانه تشکیل شده است. میانگین بارندگی درازمدت و میانگین دما به ترتیب ۳۳۲/۹ میلی‌متر و ۱۱ درجه سانتیگراد می‌باشد. تعداد ۴۰ موقعیت اندازه‌گیری به طور تصادفی در اراضی مورد مطالعه انتخاب گردید. در هر موقعیت انتخابی، چاهکی تا عمق ۳۰ سانتی‌متر حفر شد. خاک حاصل از حفر هر چاهک نیز برای تعیین ویژگی‌های زودیافت خاک در آزمایشگاه استفاده شد. نمونه‌ها پس از انتقال به آزمایشگاه، هواخشک شدند. نمونه‌های خاک به کار رفته، در ۸ کلاس بافت خاک شامل بافت رسی، لوم رسی، رس سیلتی، لوم رسی سیلتی، رس شنی، لوم رسی شنی، لوم شنی و شن لومی به منظور اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع ( $K_s$ ) طبقه‌بندی شد و لذا تنوع بافتی خاک‌ها نسبتاً مناسب می‌باشد برای اندازه‌گیری صحرائی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک از دستگاه نفوذسنج گلف (مدل KI-2800) استفاده شد. دستگاه نفوذسنج گلف، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک را به روش بار ثابت در چاهک اندازه‌گیری می‌نماید. این دستگاه دارای قابلیت‌های فراوان همچون امکان حمل آسان، استفاده از یک کاربر، زمان اندازه‌گیری کمتر نسبت به سایر روش‌ها و نیاز به آب اندک می‌باشد. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی مکان اندازه‌گیری‌های هدایت هیدرولیکی اشباع و نمونه‌برداری‌ها را نشان می‌دهد.

در این تحقیق ویژگی‌های زودیافت خاک شامل جرم مخصوص ظاهری خاک به روش سیلندر (۹)، جرم مخصوص حقیقی به روش پیکنومتر، فراوانی نسبی ذرات به روش هیدرومتری (۱۵)، میزان رطوبت اشباع خاک به روش وزنی، رطوبت ظرفیت زراعی با استفاده



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی مکان اندازه‌گیری‌های هدایت هیدرولیکی اشباع و نمونه‌برداری‌ها در دشت ارومیه

جدول ۱- توابع انتقالی مورد مطالعه در پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک

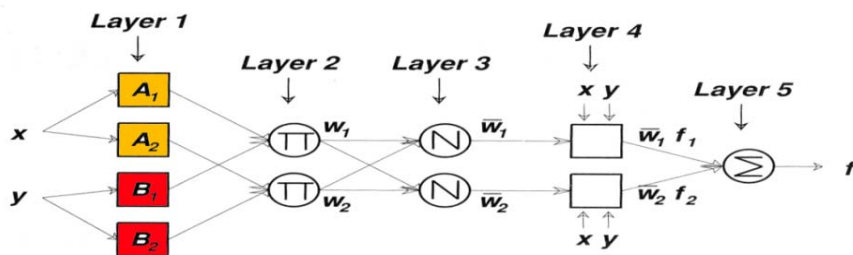
ردیف	نام محقق	رابطه
۱	کوسی و همکاران (۱۹۸۴)	$K_S = 7.05556 \times 10^{-6} \times 10^{0.0064(c) - 0.6 + 0.0126(S)^2}$
۲	ساکستون و همکاران (۱۹۸۶)	$K_S = 2.778 \times 10^{-6} \exp(12.012 - 7.55 \times 10^{-2}(S) + \{-3.895 + 3.671 \times 10^{-2}(S) - 0.1103(C) + 8.7546 \times 10^{-4}(C)^2\} / \theta_s)$ $K_S = 2.778 \times 10^{-6} \exp(x)$
۳	براکنسیک و همکاران (۱۹۸۵)	$x = 19.52348(\theta_s) - 8.96847 - 0.028212(C) + 1.8107 \times 10^{-4}(S)^2 - 9.4125 \times 10^{-3}(C)^2 - 8.395215(\theta_s)^2 + 0.077718(S)(\theta_s) - 0.00298(S)^2(\theta_s)^2 - 0.019492(C)^2(\theta_s)^2 + 1.73 \times 10^{-5}(S)^2(C) + 0.02733(C)^2(\theta_s) + 0.001434(S)^2(\theta_s) - 3.5 \times 10^{-6}(C)^2(S)$ $K_S = 1.5 \times 10^{-6} \exp(-0.07(S) - 0.167(C))$
۴	کمپل و همکاران (۱۹۹۴)	$K_S = 156.92 \exp(-0.1975C)$
۵	پاکت و همکاران (۱۹۸۵) (۲۴)	$K_S = 4 \times 10^{-5} (1.3 / \rho_b)^{1.3} (\sqrt{d_g} + 0.2 \sigma_g) \exp(-6.88(C) - 3.7(Si) - 0.025)$
۶	کمپل (۱۹۸۵) (۱۲)	$K_S = 2.3 \exp(3.52 + 0.423 \log d_g - 2.19 \log \sigma_g + 1.42 \log \theta_e)$
۷	نوابیان و همکاران (۲۰۰۴)	$K_S = 2.85 \exp(4.45 - 2.25 \log \sigma_g + 0.572 \ln \theta_e) - 10.76$
۸	نوابیان و همکاران (۲۰۰۴)	$K_S = -1.162 + (3d_g)$
۹	قربانی دشتکی و همکاران (۱۹۹۳)	$K_S = 9.56 - 0.81 \log Si - 1.09 \log C - 4.64 \rho_b$
۱۰	چاربو (۱۹۹۲) (۱۸)	$K_S = 0.0277 \times \theta_e^{1.3}$
۱۱	آیمرن و همکاران (۲۰۰۴)	

$\theta_s$ : میزان رطوبت اشباع خاک، C، Si، S: به ترتیب درصد رس، سیلت و شن خاک،  $\rho_b$ : جرم مخصوص ظاهری،  $d_g$  و  $\sigma_g$ : به ترتیب میانگین و انحراف معیار هندسی ذرات خاک،  $\theta_{fc}$ : رطوبت در حد ظرفیت زراعی خاک و  $\theta_e$ : تخلخل مؤثر خاک می‌باشد.

مقادیر RMSE انتخاب گردید. در ابتدا ۱۱ مدل عصبی - فازی هر کدام با ۱ ورودی (شامل درصد شن، سیلت، رس، میانگین هندسی قطر ذرات، انحراف معیار هندسی قطر ذرات، جرم مخصوص حقیقی، جرم مخصوص ظاهری، رطوبت اشباع، رطوبت ظرفیت زراعی، تخلخل کل و تخلخل مؤثر) و فقط یک تکرار به منظور برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع اجرا گردید. در مراحل بعد و با استفاده از سامانه عصبی - فازی، ۵۵ مدل با ۲ لایه ورودی، ۱۶۵ مدل با ۳ لایه ورودی و در نهایت ۳۳۰ مدل با ۴ لایه ورودی اجرا شد. بعد از انتخاب ۴ ورودی برتر به منظور برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع در نرم‌افزار Matlab 7.8 برای استفاده از سیستم عصبی - فازی، روش منقطع‌سازی شبکه‌ای در نظر گرفته شد. در تمامی مدل‌های ارائه شده، اندازه گام‌ها ۰/۰۱ و تعداد تکرار ۱۰۰ در نظر گرفته شد. در روش جداسازی شبکه‌ای از پنج تابع عضویت مثلثی (Trimf)، دوزنقه‌ای (Trapmf)، گوسین (Gaussmf)، زنگوله‌ای (Gbellmf) و سیگموئیدی (Dsigmf) استفاده شده است.

در این تحقیق برای ارزیابی کارایی مدل‌های ارائه شده توسط مدل‌های رگرسیونی و سامانه استنتاج تطبیقی عصبی - فازی به منظور برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با استفاده از ویژگی‌های فیزیکی خاک، از معیارهای ضریب تعیین  $R^2$ ، ریشه میانگین مربعات خطا RMSE و میانگین خطای مطلق MAE استفاده گردید. روابط مربوط به این آماره‌ها به صورت زیر می‌باشد.

سامانه استنتاج عصبی - فازی از الگوریتم‌های شبکه عصبی و منطق فازی، به منظور طراحی نگاشت غیر خطی بین فضای ورودی و خروجی استفاده می‌کند. این سیستم، شبکه‌ای ۵ لایه‌ای متشکل از گره‌ها و کمان‌های اتصال‌دهنده گره‌ها می‌باشد. ساختار مناسب سامانه عصبی - فازی، متناسب با داده‌های ورودی، درجه عضویت، قوانین و توابع درجه عضویت خروجی انتخاب می‌شود. شکل ۳ نمایشی از معماری شبکه عصبی - فازی با چهار ورودی، یک خروجی و دو قانون می‌باشد. لایه اول در سیستم‌های عصبی - فازی، وظیفه دریافت ورودی‌ها و تعیین درجه عضویت آن‌ها به هر یک از مجموعه‌های عصبی - فازی از طریق توابع عضویت می‌باشد. با ضرب مقادیر ورودی به هر گره در یکدیگر، وزن قانون‌ها ( $w_i$ ) در لایه دوم به دست می‌آید. در لایه سوم عمل محاسبه وزن نسبی قوانین ( $\bar{w}_i$ ) انجام می‌گیرد. لایه چهارم، لایه قوانین است که گره‌های موجود نتایج قوانین ( $\bar{w}_i f$ ) را ارائه می‌کند. لایه آخر خروجی نهایی است که هدف آن حداقل نمودن اختلاف خروجی به دست آمده از شبیه‌سازی و خروجی واقعی است. شایان ذکر است که دانستن ویژگی‌های مربوط به داده‌ها در هنگام انتخاب داده‌های آموزشی و آزمون بسیار حائز اهمیت می‌باشد. شبکه استنتاج تطبیقی عصبی - فازی ارائه شده در این تحقیق با ۴ لایه در ورودی، شامل مقادیر شن، سیلت، جرم مخصوص ظاهری و جرم مخصوص حقیقی و یک لایه خروجی شکل گرفته است. این ۴ لایه ورودی از بین ۵۶۱ مدل شبیه‌سازی شده توسط مدل سامانه عصبی - فازی در نرم‌افزار Matlab 7.8 با توجه به



شکل ۳- ساختار سامانه استنتاج تطبیقی عصبی- فازی

می‌دهد که دامنه تغییرات هدایت هیدرولیکی اشباع از ۷/۴۴ تا ۴/۲۳ سانتی‌متر بر روز می‌باشد که طیف نسبتاً وسیعی را شامل می‌گردد. در بین خاک‌های مورد مطالعه در این تحقیق بافت لوم شنی از همه درشت‌تر است و بیشترین هدایت هیدرولیکی اشباع نیز در این بافت خاکی اندازه‌گیری شده است. بازه اندازه‌گیری شده تخلخل مؤثر از ۴/۸۱ تا ۴۳/۷۱ درصد متغیر می‌باشد که کمترین آن مربوط به بافت لوم رسی است. در بین پارامترهای فیزیکی خاک، جرم مخصوص حقیقی کمترین و هدایت هیدرولیکی اشباع بیشترین ضریب تغییرات را دارند. مقادیر شاخص‌های آماری مورد استفاده در ارزیابی عملکرد توابع انتقالی مورد مطالعه در جدول ۳ ارائه شده است.

در جدول ۳، مقدار P بیانگر درصد معنی‌دار بودن مدل از لحاظ آماری می‌باشد. در تمامی روش‌ها به غیر از روش‌های ساکستون (۲۵)، براکنسیک (۱۰) و کمپل (۱۳)، اختلاف آماری معنی‌داری بین متوسط مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده در سطح ۹۵ درصد وجود دارد ( $P < 0.05$ ). نتایج نشان داد که در بین مدل‌های مورد مطالعه، مدل براکنسیک و همکاران (۱۰) از نظر هر دو شاخص ارزیابی، دارای دقت پایین در پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع می‌باشد.

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

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

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - P_i|}{n} \quad (6)$$

که در این روابط، n: تعداد مشاهدات،  $O_i$ : مقدار مشاهده‌ای داده،  $O_{ave}$ : میانگین مقادیر مشاهده‌ای داده،  $P_i$ : مقدار پیش‌بینی شده برای داده مورد نظر و  $P_{ave}$ : میانگین مقادیر پیش‌بینی شده می‌باشند. هر چه میزان خطا (RMSE و MAE) کمتر و میزان همبستگی داده‌ها ( $R^2$ ) بیشتر باشد، میزان کارایی مدل بیشتر است. علاوه بر این سه شاخص، از برازش خط مستقیم و آزمون آماری در سطح ۹۵ درصد برای ارزیابی مدل‌های مختلف استفاده گردید (۲۸). در این پژوهش، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها توسط نرم‌افزار Minitab انجام گرفت.

## نتایج و بحث

خلاصه اطلاعات آماری پارامترهای اندازه‌گیری شده برای ۴۰ نمونه خاک این تحقیق در جدول ۲ ارائه شده است. بررسی این جدول نشان

جدول ۲- خلاصه اطلاعات آماری خصوصیات اندازه‌گیری شده در ۴۰ نمونه خاک مورد مطالعه

ویژگی	واحد	دامنه	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات
جرم مخصوص ظاهری	$g/cm^3$	۰/۶۶	۱/۰۲	۱/۶۸	۱/۳۵	۰/۱۷	۰/۱۲
جرم مخصوص حقیقی	$g/cm^3$	۰/۲۳	۲/۴۹	۲/۷۲	۲/۶۳	۰/۰۵	۰/۰۲
شن	درصد	۶۲/۵۰	۱۲/۵	۷۵	۳۵/۳۸	۱۸/۲۷	۰/۵۲
سیلت	درصد	۳۸/۷۵	۶/۵	۴۵/۲۵	۲۵/۱۶	۱۱/۲۷	۰/۴۵
رس	درصد	۳۵/۵	۱۷	۵۲/۵	۳۹/۴۷	۹/۴۴	۰/۲۴
رطوبت اشباع ( $\theta_s$ )	$m^3/m^3$	۰/۳۶	۰/۲۷	۰/۶۳	۰/۴۴	۰/۱	۰/۲۲
رطوبت ظرفیت زراعی ( $\theta_{fc}$ )	$m^3/m^3$	۰/۳۳	۰/۰۶	۰/۳۹	۰/۲۵	۰/۰۹	۰/۳۵
تخلخل مؤثر	درصد	۳۸/۸۹	۴/۸۱	۴۳/۷۱	۲۳/۵۹	۸/۱	۰/۳۴
هدایت هیدرولیکی اشباع ( $k_s$ )	$m/d$	۴/۱۶	۰/۰۷۴	۴/۲۳	۰/۶۴	۰/۸۷	۱/۳۶

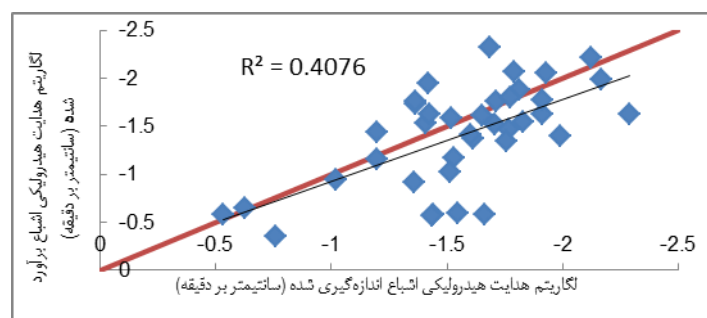
جدول ۳- مقادیر شاخص‌های آماری مورد ارزیابی توابع انتقالی مورد مطالعه

ردیف	روابط رگرسیونی	RMSE	MAE	p
۱	کوسبی و همکاران (۱۹۸۴)	۰/۷۹۲	۰/۰۶۵	۰
۲	ساکستون و همکاران (۱۹۸۶)	۱/۰۶۱	۰/۲۹۶	۰/۸۱۹
۳	براکنسیک و همکاران (۱۹۸۵)	۱/۱۸۶	۰/۴۹۶	۰/۸۵۸
۴	کمپل و همکاران (۱۹۹۴)	۱/۰۰۹	۰/۲۸۹	۰/۲۵
۵	پاکت و همکاران (۱۹۸۵)	۰/۹۹۴	۰/۱۶۱	۰
۶	کمپل و همکاران (۱۹۸۵)	۰/۹۰۱	۰/۱۴۶	۰
۷	نویبان و همکاران (۲۰۰۴)	۰/۹۷۲	۰/۱۵۸	۰/۰۰۱
۸	نویبان و همکاران (۲۰۰۴)	۰/۸۰۱	۰/۱۲۹	۰/۰۰۱
۹	قربانی دشتکی و همکاران (۱۹۹۳)	۰/۸۴۹	۰/۱۳۸	۰
۱۰	چاربو (۱۹۹۲)	۱/۰۷۲	۰/۱۷۴	۰
۱۱	آیمرون و همکاران (۲۰۰۴)	۰/۱۷۴	۰/۰۲۸	۰/۰۱۷

تخلخل مؤثر خاک استفاده شده است. بنابراین کاربرد تخلخل مؤثر خاک به عنوان یک شاخص تأثیرگذار در برآورد هدایت آبی اشباع خاک از اهمیت ویژه برخوردار است. برای ارائه تصویر روشنی از عملکرد تابع آیمرون و همکاران (۸) در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع، مقادیر اندازه‌گیری شده هدایت هیدرولیکی اشباع بر حسب سانتی‌متر بر دقیقه در مقابل مقادیر لگاریتم هدایت هیدرولیکی اشباع حاصل شده از مدل آیمرون در شکل ۴ نشان داده شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد در مدل آیمرون و همکاران (۸) نقاط به خوبی در اطراف خط یک به یک پراکنده شده‌اند که نشان‌دهنده مناسب بودن این مدل در خاک‌های اراضی مورد مطالعه است.

ساختار بهینه مدل سامانه استنتاج تطبیقی عصبی- فازی از بین تمامی آرایش‌ها و دیگر توابع عضویت که دارای بهترین عملکرد بود، در جدول ۴ معرفی شده است. به منظور برآورد میزان هدایت هیدرولیکی اشباع با توجه به نتایج عملکرد ساختارهای سیستم استنتاج عصبی- فازی و بر اساس مقادیر حداکثر عامل ضریب همبستگی ( $R^2$ ) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) (جدول ۴)، می‌توان استنباط کرد که مدل ۵ در حالت مطلوب ( $RMSE=0/0006$ ) و ( $R^2=1$ ) می‌باشد.

در این مدل، مقدار حداکثر پارامتر RMSE برابر ۱/۱۸۶ به دست آمد. مدل آیمرون و همکاران (۸) با استفاده از پارامتر تخلخل مؤثر، از نظر شاخص‌های ارزیابی RMSE و MAE توانایی پیش‌بینی دقیق‌تری نسبت به دیگر مدل‌ها را داشت. نتایج نشان داد که در بین تمامی مدل‌های موجود، مدل آیمرون و همکاران (۸) با کمترین مقدار خطا برای پارامتر RMSE (۰/۱۷۴- متر در روز) بهترین برآورد  $k_s$  را در اراضی مورد مطالعه داشت. آهوچا و همکاران (۷) نیز شاخص تخلخل مؤثر را به عنوان ویژگی تأثیرگذار خاک در میزان هدایت هیدرولیکی اشباع معرفی نمودند. پس از مدل آیمرون (۸)، مدل کوسبی و همکاران (۱۴) مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع را با دقت بالاتری نسبت به سایر توابع انتقالی پیش‌بینی نمود. این در حالی است که هان‌لی (۱۷)، در ارزیابی توابع انتقالی برای هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از ویژگی‌های زودیافت خاک مانند بافت خاک و درصد کربن خاک به روش تخمین معکوس پارامترها، تابع کوسبی و همکاران (۱۴) را به عنوان برترین تابع گزارش کرد. مدل‌های نویبان و همکاران (۲۲) و دشتکی و همکاران (۲) با مقدار MAE به ترتیب ۰/۱۲۹ و ۰/۱۳۸، از لحاظ دقت برآورد در رتبه‌های بعدی قرار دارند. نتایج این تحقیق، با نتایج نویبان و همکاران (۲۲) مبتنی بر برتر بودن مدل ۳ ارائه شده توسط ایشان مطابقت دارد. در این مدل نیز از ویژگی



شکل ۴- مقایسه لگاریتم هدایت هیدرولیکی اشباع پیش‌بینی شده توسط مدل آیمرون با لگاریتم مقادیر اندازه‌گیری شده



برتر بودن مدل عصبی-فازی نسبت به تابع انتقالی رگرسیونی است. ضمن اینکه در ورودی این مدل بر خلاف مدل رگرسیونی از رطوبت ظرفیت زراعی استفاده نشده که این امر می‌تواند باعث کاهش زمان و هزینه‌های مربوط به آزمایش صفحات فشاری (برای محاسبه ظرفیت زراعی) گردد.

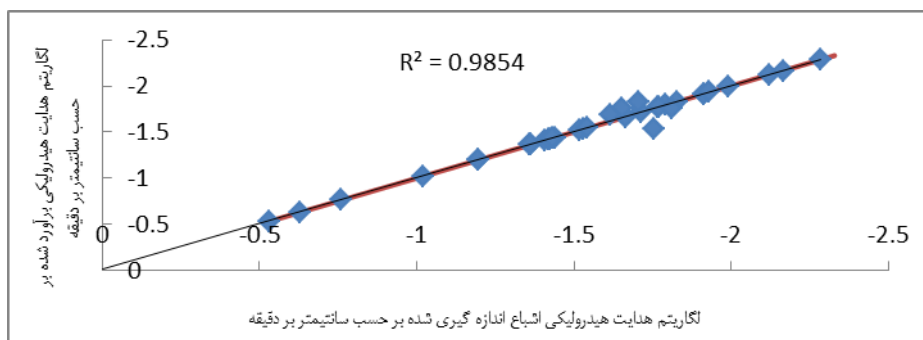
اطمینان از برآوردها در پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع از طریق خصوصیات فیزیکی خاک نیز قابل ارزیابی است. در شکل ۶ مقادیر مشاهداتی و برآورد شده میزان هدایت هیدرولیکی اشباع توسط نمونه‌های خاک با ۳ نوع بافت خاکی متفاوت توسط ساختار بهینه مدل رگرسیونی و سیستم عصبی-فازی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. شایان ذکر است که این نمونه‌ها در محاسبه مدل‌های برتر دخالت نداشتند. با توجه به شکل ۶ در خاک‌های سنگین (clay loam) در مقایسه با خاک‌های متوسط (silty clay loam) و نسبتاً سبک (loam silty) میزان انطباق بین مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده توسط مدل رگرسیونی بیشتر است. در خاک‌های متوسط و نسبتاً سبک حرکت آب در داخل خاک از پیچیدگی بیشتری برخوردار است. در این خاک‌ها منافذ درشت نحوه حرکت آب در داخل خاک را کنترل می‌کنند (۲). این امر باعث می‌گردد تا مقادیر بالایی برای هدایت هیدرولیکی اشباع در این خاک‌ها حاصل شود که در نتیجه تابع کم‌برآورد رگرسیونی در تخمین هدایت هیدرولیکی این خاک‌ها ضعیف عمل نماید.

بر طبق این نتایج، بهترین تابع عضویت تابع عضویت Dsig (سیگموئیدی) می‌باشد. ضعیف‌ترین نتایج نیز مربوط به مدل‌های ۱ و ۳ با توابع عضویت Trimf و Gaussmf است. یزدانی و همکاران (۶) نیز مطابق با نتایج این تحقیق نشان دادند که در صورت استفاده از مدل عصبی-فازی، تخمین مورد اطمینان و قابل قبولی از هدایت هیدرولیکی اشباع به دست آمد. در همین راستا، برتر بودن سامانه عصبی-فازی در برآورد میزان نفوذ خاک از سوی نحوی‌نیا و همکاران (۵) نیز تأیید شد. آنچه از نتایج به دست آمده پیدا و مسلم است، توانایی بالای سامانه استنتاج تطبیقی عصبی-فازی در محاسبه مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع عمودی نسبت به تابع انتقالی رگرسیونی (مدل آیمرن و همکاران) است. بهینه بودن شبکه عصبی نسبت به توابع رگرسیونی از سوی وستن و همکاران (۲۹) نیز گزارش گردیده است. آنها اشاره نمودند که در صورتی که بیش از سه ورودی وجود داشته باشد معمولاً مدل‌های عصبی مصنوعی بهتر از روش‌های رگرسیونی عمل می‌کنند.

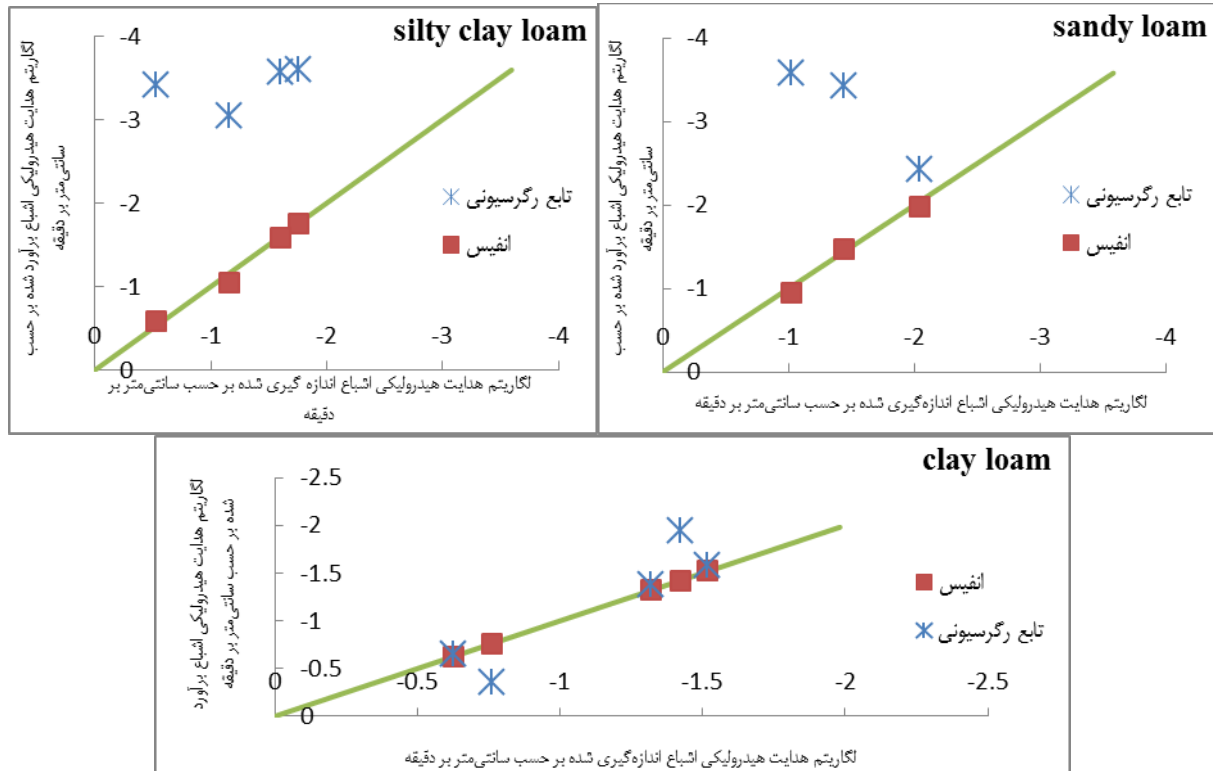
در ادامه برای ارائه تصویری روشن از دقت برآوردها توسط مدل عصبی-فازی، مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع برآورد شده (بر حسب سانتی‌متر بر دقیقه) توسط شبکه معرفی شده (مدل ۵) در مقابل مقادیر واقعی هدایت هیدرولیکی اشباع (بر حسب سانتی‌متر بر دقیقه) در شکل ۵ نشان داده شده است. همچنین بالا بودن ضرایب همبستگی نیز نشان‌دهنده وابستگی بسیار نزدیک مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده می‌باشد. نتایج موجود در شکل ۵ و جدول ۴ نشانگر

جدول ۴- ساختار و مقادیر پارامترهای سامانه استنتاج تطبیقی عصبی-فازی

مدل	ارایش شبکه	قانون یادگیری	تابع عضویت	آموزش		آزمون	
				RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>
۱	۴-۱-۱	هیبرید	Trim	۱	$10^{-7} \times 1/3$	۰/۹۷	۰/۰۰۵
۲	۴-۱-۱	هیبرید	Trap	۱	۰/۰۰۰۳	۰/۹۸	۰/۰۰۰۶
۳	۴-۱-۱	هیبرید	Gauss	۱	$10^{-7} \times 1/5$	۰/۹۷	۰/۰۰۲۵
۴	۴-۱-۱	هیبرید	Gbell	۱	۰/۰۰۰۳	۰/۹۷	۰/۰۰۲۲
۵	۴-۱-۱	هیبرید	Dsig	۱	$10^{-7} \times 1/2$	۰/۹۸	۰/۰۰۰۶



شکل ۵- مقایسه لگاریتم هدایت هیدرولیکی اشباع پیش‌بینی شده توسط مدل ۵ عصبی-فازی با لگاریتم مقادیر اندازه‌گیری شده



شکل ۶- مقایسه مقادیر مشاهداتی و برآورد شده هدایت هیدرولیکی اشباع در بافت‌های مختلف توسط ساختار بهینه مدل رگرسیونی و سیستم عصبی - فازی

بیانگر بسیاری از خصوصیات خاک می‌باشد، توسط پارامترهای زودیافت فیزیکی خاک و با استفاده از ۱۱ مدل رگرسیونی به عنوان مدل آماری و سیستم استنتاج عصبی- فازی به عنوان مدل تجربی انجام گردیده است. نتایج نشان داد که در بین تمامی مدل‌های رگرسیونی موجود، مدل آیمرون و همکاران (۸) با کمترین مقدار خطا برای پارامتر RMSE (۰/۱۷۴ متر در روز) بهترین برآورد  $k_s$  را در اراضی مورد مطالعه داشت. نتایج این تحقیق بر اهمیت کاربرد تخلخل مؤثر به عنوان یک پارامتر زودیافت مهم در دقت توابع انتقالی رگرسیونی تأکید دارد.

در بررسی سیستم‌هایی که روابط بین متغیرهای سیستم نادقیق و مبهم است، در نظر گرفتن ساختار فازی برای مدل‌سازی سیستم ضروری به نظر می‌رسد. بالا بودن ضرایب همبستگی و کم بودن شاخص‌های خطا نشان دهنده وابستگی بسیار نزدیک مقادیر مشاهداتی و برآوردی توسط مدل عصبی- فازی ارائه شده است. نتایج حاصل شده در تحقیق نشانگر برتر بودن مدل عصبی- فازی با مقدار  $RMSE=0/0006$  نسبت به تابع انتقالی رگرسیونی است. ضمن اینکه در ورودی این مدل بر خلاف مدل رگرسیونی از رطوبت ظرفیت زراعی استفاده نشده که این امر می‌تواند باعث کاهش زمان و هزینه‌های مربوط به آزمایش صفحات فشاری (برای محاسبه ظرفیت

اما مدل عصبی- فازی قادر است توانایی برآورد را در تمام شرایط و بافت‌های مختلف خاکی حفظ کند که این امر نشان از دقت بیشتر و قابلیت تخمین بالای این سیستم دارد. سیستم استنتاج عصبی- فازی شامل دو رویکرد اصلی است. یکی رویکرد فازی که ابهام و عدم قطعیت که یک جزء ذاتی داده‌های مشاهده شده است را منعکس می‌کند و دیگر به کارگیری شبکه عصبی برای بهینه‌سازی پارامترهای سیستم که یک مدل غیرخطی خالص می‌باشد. این مدل از الگوریتم‌های یادگیری شبکه عصبی و منطق فازی به منظور طراحی نگاشت غیرخطی بین فضای ورودی و خروجی و ترکیب قدرت زبانی یک سیستم فازی با قدرت عددی یک شبکه عصبی برای پیش‌بینی وقایع استفاده می‌نماید. همان‌گونه که اشاره شد یزدانی و همکاران (۶) نیز بهتر بودن وضعیت مدل عصبی- فازی را نسبت به تابع رگرسیونی در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع در تحقیق خود گزارش کردند. اما برخلاف نتایج حاصل شده در این تحقیق، مدل‌های ارائه شده در تحقیق ایشان در بافت رسی به دلیل وجود سله و انبساط و انقباض رس دقت قابل قبولی نداشت.

## نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر به منظور برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، که



زراعی) گردد. مدل عصبی-فازی قادر است توانایی برآورد را در تمام شرایط و بافت‌های مختلف خاکی حفظ کند که این امر نشان از دقت بیشتر و قابلیت تخمین بالای این سیستم دارد.

## منابع

- ۱- افتخاریان ل، تی تی دژا، خاکباز ب، سارنگ ا، صادقیان پ، مهین روستا ر. و نوار م. ۱۳۷۷. آزمایشگاه مکانیک خاک. ۲۷۴ صفحه.
- ۲- قربانی دشتکی ش. و همایی م. ۱۳۸۶. برآورد پارامترهای برخی مدل‌های نفوذ آب به خاک با استفاده از توابع انتقالی، مجله آبیاری و زهکشی ایران ۱ (۱): ۲۱-۳۸.
- ۳- کیا م. ۱۳۸۹. محاسبات نرم در MATLAB. انتشارات کیان رایانه سبز.
- ۴- منهج م.ب. ۱۳۸۱. مبانی شبکه‌های عصبی هوش محاسباتی. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر. جلد اول.
- ۵- نحوی نیا م.ج، لیاقت ع.م. و پارسی نژاد م. ۱۳۸۹. کاربرد مدل‌های تجربی و آماری در پیش‌بینی میزان نفوذ آب در آبیاری جویچه‌ای. نشریه آب و خاک. جلد ۲۴. شماره ۴. ص. ۷۶۹-۷۸۰.
- ۶- یزدانی و، قهرمان ب، داوری ک. و فاضلی م. ۱۳۹۱. کاربرد بعد فراکتال اندازه ذرات خاک در برآورد هدایت هیدرولیکی اشیاع. نشریه آب و خاک. جلد ۲۶. شماره ۳. ص. ۶۴۸-۶۵۹.
- 7- Ahuja L.R., Naney J.W., Green P.E., and Nielsen D.R. 1984. Macroporosity to characterize spatial variability of hydraulic conductivity and effects of land management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:699–702.
- 8- Aimrun W., Amin M.S.M., and Eltaib S.M. 2004. Effective porosity of paddy soils as an estimation of its saturated hydraulic conductivity. *Geoderma* 121:197–203.
- 9- Blake G.R. and Hartge K.H. 1986. Bulk Density. In: Klute, A. (ed.) *Methods of soil Analysis*. Part 1.2<sup>nd</sup> ed. Agron. Monogr. 9. ASA. Madison, WI. Pp. 363-375.
- 10- Brakensiek D.L., Rawls W.J., and Stephenson G.R. 1984. Modifying SCS hydrologic soil groups and curve numbers for range land soils. ASAE paper no. PNR-84203T St. Joseph, Mi.
- 11- Borgesen C.D., and Schaap M.G. 2005. Point and Parameter Pedotransfer Functions for Water Retention Predictions for Danish Soils. *Geoderma* 127:154–167.
- 12- Campbell G.S. 1985. *Soil Physics with Basic Elsevier*. New York.
- 13- Campbell G.S., and Shiozawa S. 1994. Prediction of hydraulic properties of soils using particle-size distribution and bulk density data. In: van Genuchten, M. Th., et al. (ed.), *Proceedings of the International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*. University of California, Riverside, CA, p. 317–328.
- 14- Cosby B.J., Hornberger G.M., Glapp R.B., and Ginn T.R. 1984. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soil. *Water Resour. Res.* 20(6): 682-690.
- 15- Gee G.W., Or D. 2002. Particle-size analysis. In: Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.), *Methods of Soil Analysis*, Part 4 SSSA Book Series No. 5. Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI, pp. 255–293.
- 16- Hasebe M., and Nagayama Y. 2002. Reservoir Operation Using The Neural Network and Fuzzy System For Dam Control and Operation Support, Elsevier, *Advances in Engineering Software* 33:245-260.
- 17- Hun lee Do. 2005. Comparing the inverse parameter estimation approach with pedo- transfer function method for estimating soil hydraulic conductivity. *Geoscience journal*, 9(3):269- 276.
- 18- Jabro J.D. 1992. Estimation of saturated hydraulic conductivity of soils from particle size distribution and bulk density data. *Trans. ASAE*, 35 (2):557-560.
- 19- Koekkoek E.J.W., and Booltink H. 1999. Neural Network Models to Predict Soil Water Retention. *Eur. J. Soil Sci.* 50:489–495.
- 20- Merdun H., Cinar O., 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 and Tillage Research*, 90:108-116.
- 21- Mermoud A., and Xu D. 2006. Comparative analysis of three methods to generate soil hydraulic functions. *Soil & Tillage Research*, 87: 89-100.
- 22- Navabian M., Liaghat A.M., and Homae M. 2004. Estimating soil saturated hydraulic conductivity using pedotransfer functions. *J. Agric. Eng. Res.* 4:16. 1-11.
- 23- Pachepsky Y.A., Timlin D., and Varallyay G. 1996. Artificial neural networks to estimate soil water retention from easily measurable data. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 60:727-733.
- 24- Puckett W.E., Dane J.H., and Hajek B.F. 1985. Physical and mineralogical data to determine soil hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 831-836.
- 25- Saxton K.E., Rawls W.J., Romberger J.S., and Pependick R.I. 1986. Estimating generalized soil-water

- 
- characteristics from texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50: 1031-1036.
- 26- Schaap M.G., Leij F.J., and Van Genuchten M.T. 1998. Neural network analysis for hierarchical prediction of soil hydraulic properties. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 62:847-855.
- 27- Shirazi M.A., Boersma L. 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture. *SoilSci. Soc. Am. J.* 48: 142-147.
- 28- Wagner B., Tarnawski V.R., Hennings V., Müller U., Wessolek G., and Plagge R. 2001. Evaluation of pedo-transfer functions for unsaturated soil hydraulic conductivity using an independent data set. *Geoderma*. 102: 275-297.
- 29- Wösten J.H.M., Pachepsky Ya. A., and Rawls W.J. 2001. Pedo transfer functions: bridging gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology*, 251: 123-150.
- 30- Zeleke T.B., and Si B.C. 2005. Scaling Relationships between Saturated Hydraulic Conductivity and Soil Physical Properties. *Soil Science Society of America Journal*. 69:1691-1702.



## Evaluation of Regression and Neuro\_Fuzzy Models in Estimating Saturated Hydraulic Conductivity

J. Behmanesh<sup>1\*</sup>-E. Rezaie<sup>2</sup>

Received:17-06-2013

Accepted:29-11-2014

### Abstract

Study of soil hydraulic properties such as saturated and unsaturated hydraulic conductivity is required in the environmental investigations. Despite numerous research, measuring saturated hydraulic conductivity using by direct methods are still costly, time consuming and professional. Therefore estimating saturated hydraulic conductivity using rapid and low cost methods such as pedo-transfer functions with acceptable accuracy was developed. The purpose of this research was to compare and evaluate 11 pedo-transfer functions and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) to estimate saturated hydraulic conductivity of soil. In this direct, saturated hydraulic conductivity and physical properties in 40 points of Urmia were calculated. The soil excavated was used in the lab to determine its easily accessible parameters. The results showed that among existing models, Aimrun et al model had the best estimation for soil saturated hydraulic conductivity. For mentioned model, the Root Mean Square Error and Mean Absolute Error parameters were 0.174 and 0.028 m/day respectively. The results of the present research, emphasises the importance of effective porosity application as an important accessible parameter in accuracy of pedo-transfer functions.

sand and silt percent, bulk density and soil particle density were selected to apply in 561 ANFIS models. In training phase of best ANFIS model, the R<sup>2</sup> and RMSE were calculated 1 and  $1.2 \times 10^{-7}$  respectively. These amounts in the test phase were 0.98 and 0.0006 respectively. Comparison of regression and ANFIS models showed that the ANFIS model had better results than regression functions. Also Nuro-Fuzzy Inference System had capability to estimatae with high accuracy in various soil textures.

**Keywords:** Saturated Hydraulic Conductivity, Soil Physical Characteristics, Adaptive Neuro- Fuzzy Inference System

---

1,2-Associate Professor and MSc Student, Department of Water Engineering, University of Urmia, Urmia, Iran  
(\*-Corresponding Author Email: j.behmanesh@urmia.ac.ir)