

کاربرد بعد فراکتال اندازه ذرات خاک در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع

وحید یزدانی^{۱*} - بیژن قهرمان^۲ - کامران داوری^۳ - محمدابراهیم فاضلی^۴

تاریخ دریافت: ۸۹/۱۱/۱۷

تاریخ پذیرش: ۹۰/۱۱/۲۳

چکیده

یکی از جنبه‌های مهم بررسی خاک، دانستن روابط و همبستگی بین خصوصیات مختلف خاک و بیان کمی آنها در قالب مدل‌های آماری است. هدف از این پژوهش برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع توسط رگرسیون و شبکه استنتاج تطبیقی عصبی - فازی، با استفاده از پارامترهای زودیافت خاک می‌باشد. لذا آزمایشات مربوط به محاسبه هدایت هیدرولیکی اشباع و محاسبه خصوصیات فیزیکی خاک در ۵۴ نقطه در زمین، که با فواصل ۵ در ۵ متر مشخص شده بودند، صورت گرفت. همچنین مقادیر چگالی ظاهری با روش کلوخه پارافینی، بعد فراکتال اندازه ذرات توسط روش الک خیس، درصد شن، رس و سیلت توسط هیدرومتری و هدایت هیدرولیکی اشباع بالای سطح ایستابی توسط روش استوانه‌های مضاعف اندازه‌گیری شد. بهترین مدل رگرسیونی برای تابع انتقالی، بر اساس حداقل‌سازی تابع هدفی که براساس پارامترهای آماری R^2 ، RMSE و MAE بنا نهاده شده بود انتخاب گردید. پارامترهای درصد شن، چگالی ظاهری، چگالی حقیقی، بعد فراکتال اندازه ذرات، تخلخل و درصد سیلت به عنوان ورودی انتخاب شدند. در تابع انتقالی ارائه شده مقادیر R^2 ، RMSE، NRMSE و MAE به ترتیب برابر ۰/۶۵، ۰/۰۱۷، ۰/۹۶ و ۰/۰۱۲ می‌باشند. شبکه استنتاج تطبیقی عصبی - فازی با ۴ لایه در ورودی شامل چگالی ظاهری، چگالی حقیقی، تخلخل و بعد فراکتال 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 می‌باشد. با توجه به نتایج آنالیز حساسیت، تابع انتقالی رگرسیونی کمترین حساسیت را نسبت به تغییرات در تخلخل و بعد فراکتال اندازه ذرات دارد؛ در مقابل بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات در مقادیر چگالی ظاهری، درصد سیلت و درصد شن دارد. مدل استنتاج تطبیقی عصبی - فازی همانند تابع انتقالی رگرسیونی، نسبت به تغییرات در چگالی ظاهری بیشتر از سایر متغیرها حساس می‌باشد، ضمن اینکه نتایج بیانگر برتری سامانه عصبی - فازی نسبت به تابع رگرسیونی است. ارزیابی مدل‌ها نشان داد که در خاک‌های رسی برآوردها دقت قابل قبولی ندارد؛ در مقابل برای تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک‌هایی با بافت سبک تا متوسط (لومی شنی، لوم و سیلت لوم) مناسب می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: هدایت هیدرولیکی اشباع، بعد فراکتال، خصوصیات فیزیکی خاک، سامانه عصبی - فازی، توابع انتقالی

مقدمه

مدل‌ها خصوصیات مهم خاک، که اندازه‌گیری آنها پر هزینه و زمان‌بر است، بصورت تابعی از ویژگی‌هایی که به سادگی و با هزینه کمتری قابل اندازه‌گیری هستند، بیان می‌گردد (۱۰). ویژگی‌های دیر یافت خصوصیتی از خاک هستند که اندازه‌گیری آنها زمان‌بر بوده و هزینه زیادی در بر دارد. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به هدایت هیدرولیکی اشباع و غیر اشباع و منحنی رطوبتی خاک اشاره کرد. ویژگی‌های زود یافت خاک پارامترهایی (درصد شن، سیلت و رس، منحنی دانه بندی، چگالی ظاهری و حقیقی، تخلخل و ...) هستند که اندازه‌گیری آنها آسان، سریع و کم‌هزینه است و معمولاً در مطالعات اولیه خاک رایج می‌باشند. این پارامترها در اکثر توابع انتقالی جزء متغیرهای مستقل ورودی می‌باشند. در برخی توابع تنها از درصد رس استفاده شده است، مانند تابع پوکت و همکاران (۲۴)، در برخی دیگر از درصد

یکی از جنبه‌های مهم بررسی خاک، دانستن روابط و همبستگی بین خصوصیات مختلف خاک و بیان کمی آنها در قالب مدل‌های آماری است. این مدل‌ها که اصطلاحاً توابع انتقالی خاک^۵ نامیده می‌شوند، عمدتاً شامل مدل‌های رگرسیون آماری هستند. توسط این

۱ و ۳ - به ترتیب دانشجوی دکتری، استاد و دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

* - نویسنده مسئول: (Email: v.yazdany@yahoo.com)

۴ - دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد فردوس

پیش‌بینی نفوذپذیری خاک در فیلیپین استفاده کرد. شبکه‌های مورد استفاده به‌طور متوسط دارای ضریب تعیین بالایی، با میانگین 0.911 بودند. آنالیز حساسیت نشان داد که رطوبت خاک و هدایت هیدرولیکی فاکتورهای مؤثر در پیش‌بینی مدل نفوذ، با استفاده از شبکه‌های عصبی می‌باشند (۱۹).

یک نوع از شبکه‌های عصبی مصنوعی، سامانه استنتاج تطبیقی عصبی - فازی می‌باشد که در بین روش‌های نوین مدل‌سازی، سامانه‌های فازی از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند. توانایی پیاده‌سازی دانش بشری با استفاده از مفاهیم برچسب‌های زبانی و قواعد فازی، غیر خطی بودن و قابلیت سازش‌پذیری این سیستم‌ها و دقت بهتر آنها در مقایسه با سایر روش‌ها در شرایط محدودیت داده‌ها، از جمله مهم‌ترین ویژگی‌های این سیستم‌ها است (۲). نکته مهم منطق فازی امکان برقراری ارتباط بین فضای ورودی به فضای خروجی می‌باشد و سازوکار اولیه برای انجام این کار، فهرستی از جملات If-Then است که قانون نامیده می‌شود. داشتن روشی که با استفاده از آن بتوان اطلاعات موجود برای ساخت این قواعد را استفاده کرد، به‌عنوان ابزاری کارآمد بشمار می‌رود. از طرفی، شبکه‌های عصبی مصنوعی به دلیل قابلیت‌های آموزش‌پذیری با استفاده از الگوهای مختلف آموزشی می‌تواند ارتباط مناسبی بین متغیرهای ورودی و خروجی ایجاد نماید. لذا استفاده ترکیبی از سامانه استنباط فازی و شبکه عصبی مصنوعی، به‌عنوان ابزاری قدرتمند که قابلیت پیش‌بینی نتایج با استفاده از داده‌های عددی موجود را دارد، تحت عنوان سامانه استنتاج تطبیقی عصبی - فازی معرفی می‌شود. با توجه به آنچه گفته شد در هیچ کدام از توابع انتقالی تا به حال از بعد فراکتال اندازه ذرات استفاده نشده است؛ لذا استفاده از بعد فراکتال اندازه ذرات در محاسبه هدایت هیدرولیکی اشباع می‌تواند کمک قابل توجهی در علوم خاک و جریان در محیط‌های متخلخل داشته باشد.

فراکتال در مقابل ابعاد صحیح در هندسه اقلیدسی، دارای ابعاد ناصحیح می‌باشد. اجسام در هندسه فراکتالی برخلاف هندسه اقلیدوسی متقارن نیستند؛ بلکه خود متشابهند^۶. در هندسه فراکتال هرچه درجه بزرگ‌نمایی بیشتر باشد اطلاعات بیشتری دیده خواهد شد. ناهمگونی پدیده‌های فراکتالی تصادفی نیست، بلکه ناهمگونی آنها به‌طور خوشه‌ای^۷ است و به‌طور کلی ریاضیات فراکتالی به ما امکان تهیه مدل‌های مفهومی جدیدی، برای برخورد با ناهمگونی^۸ می‌دهد. بعد فراکتال اندازه ذرات خاک معیاری است از خاصیت فضاپرکنی یک توده پراکنده، ناصافی یک سطح و یا کج و معوج بودن یک خط و غالباً به فرآیندهای ایجادکننده جسم فراکتالی مربوط است. همانطور که قبلاً نیز گفته شد، خاک یک پدیده فراکتالی است.

رس و شن استفاده شده است، مانند تابع کاسبی و همکاران (۱۲) و در مواردی درصد رس و سیلت به‌عنوان متغیر مستقل ورودی به‌کار گرفته شده است، مانند تابع جبرو (۱۷). براکنسیک و همکاران (۱۱) نیز از تخلخل به‌عنوان متغیر مستقل در تابع انتقالی خود استفاده نمودند. در آغاز، توابع انتقالی بیشتر با رگرسیون خطی^۱ ساخته می‌شدند، ولی به‌تدریج رگرسیون غیرخطی جایگزین آن شد (۲۸). یکی از انواع روش‌های رگرسیون آماری روش رگرسیون خطی چندمتغیره^۲ می‌باشد. در این روش متغیرها باید از توزیع نرمال تبعیت کرده و مستقل از یکدیگر باشند و تا حد ممکن از متغیرهایی که هم‌خطی چندگانه^۳ دارند در معادلات استفاده نمی‌شود (۳). ممکن است بین داده‌هایی که می‌توانند به‌عنوان ورودی در تابع انتقالی قرارگیرند همبستگی وجود داشته باشد، برای حل این معضل از تحلیل مؤلفه‌های اصلی^۴ برای یافتن پارامترهای جدیدی که ترکیب خطی از داده‌های ورودی هستند استفاده شود (۲۸). شبکه‌های عصبی^۵ اخیراً برای بهبود تخمین‌های حاصل از توابع تجربی توسعه پیدا کرده است (۲۲). یکی از مزایای توابع انتقالی که از این روش به‌دست می‌آیند این است که نیازی به تعریف رابطه بین داده‌های ورودی و خروجی ندارند (۲۵). هنگامی که بیش از سه ورودی وجود داشته باشد معمولاً شبکه‌های عصبی مصنوعی بهتر از روش‌های رگرسیونی عمل می‌کند (۲۸). رگرسیون آماری با فرض دقیق بودن مشاهدات و متغیرها انجام می‌شود؛ درحالی‌که در سیستم‌های طبیعی مانند خاک، مشاهدات نادقیق و روابط مبهم می‌باشد. بنابراین استفاده از روش‌های برازش توابع، که قادر به تبیین ساختار مبهم سیستم و در اختیار نهادن الگوهای منطبق با واقعیت هستند، ضروری است (۶).

پاچپسکی و همکاران (۲۲) 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 می‌کند. فریت و همکاران (۱۳) از شبکه‌های عصبی مصنوعی با ساختار پرسپترون چندلایه با دو لایه پنهان و تابع عملگر سیگموئید به‌منظور برآورد رطوبت خاک استفاده کردند و دریافتند که شبکه‌های عصبی که از چنین ساختاری بهره می‌برند ابزار مناسبی برای تخمین رطوبت خاک هستند. تانگ و همکاران (۲۶) از شبکه‌های عصبی توابع پایه شعاعی برای پیش‌بینی ظرفیت تبادل استفاده کردند و دریافتند که شبکه‌های عصبی ظرفیت تبادل کاتیونی CEC را با دقت بیشتر نسبت به مدل‌های رگرسیونی چند متغیره پیش‌بینی می‌کنند. نستور (۱۹) از مدل شبکه عصبی پرسپترون چندلایه در

- 1- Linear regression
- 2- Multiple linear regression
- 3- Multicollinearity
- 4- Principal component analysis
- 5- Artificial neural network

6- Self similar

7- Cluster

8- Heterogeneity

مواد و روش‌ها

آزمایش مربوط به تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع و تعیین خصوصیات فیزیکی خاک در ۵۴ نقطه از زمین، که با فواصل ۵ در ۵ متر مشخص شده بودند، صورت گرفت (شکل ۱). همچنین مقادیر چگالی ظاهری با استفاده از روش کلوخه پارافینی اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری چگالی حقیقی بر اساس قانون ارشمیدس صورت گرفت. مقادیر رطوبت اولیه نیز با خشک کردن نمونه‌های دست نخورده در زمان آزمایش استوانه‌های مضاعف اندازه‌گیری شد.

مقدار ۵۰۰ گرم از نمونه خاک هر نقطه از شکل ۱ در زمان آزمایش استوانه‌های مضاعف، بر روی سری الک‌ها (با اندازه مش ۴/۷۵، ۳/۳۵، ۲، ۱/۱۸، ۰/۴۲۵ و ۰/۱۵ میلی‌متر) قرار داده شد. برای محاسبه بعد فراکتال از روش الک‌های خیس استفاده گردید. با محاسبه وزن خاک روی الک‌ها توسط ترازوی دیجیتال، با دقت ۰/۰۰۱ گرم، و تقسیم آن بر وزن هر ذره با قطر مشخص (اندازه سوراخ الک)، تعداد ذرات باقی‌مانده در روی هر الک محاسبه گردید و با استفاده از رابطه زیر مقدار بعد فراکتال هر نمونه خاک تعیین شد (۲۱).

$$\sum_{x=1}^x \frac{M(x)}{x^3} = k_c x^{-D_m} \quad (1)$$

که در آن D_m بعد فراکتالی مربوط به تعداد خاکدانه‌ها، x اندازه کلوخه (میانگین دو الک بالایی و پایینی) و K_c مقدار ثابت برازش می‌باشد. در معادله ۱، D_m بیانگر خرد شدن ذرات است و با افزایش D خرد شدن نیز افزایش می‌یابد. در واقعیت ذرات خاک دارای شکل یکسان و منظمی نیستند؛ لذا برای ساده‌سازی دو نوع شکل برای ذرات (کروی^۳ یا مکعبی^۴) فرض شد. برای محاسبه بعد فراکتال اندازه ذرات ذرات کروی از معادلات ۲ تا ۴ استفاده شده است.

$$N(X > x) = \sum_{x=1}^x N_s(x) \quad (2)$$

$$\sum_{x=1}^x \frac{6M(x)}{\pi \rho x^3} = k x^{-D_m} \quad (3)$$

$$N_s(x) = \frac{6M(x)}{\pi \rho x^3} \quad (4)$$

در روابط فوق $N_s(x)$ تعداد خاکدانه‌های کروی با قطر x ، $M(x)$ کل جرم ذرات با اندازه x و p چگالی حقیقی ذرات خاک است. همچنین بعد فراکتال برای ذرات مکعبی شکل، از معادله ۵ محاسبه گردید.

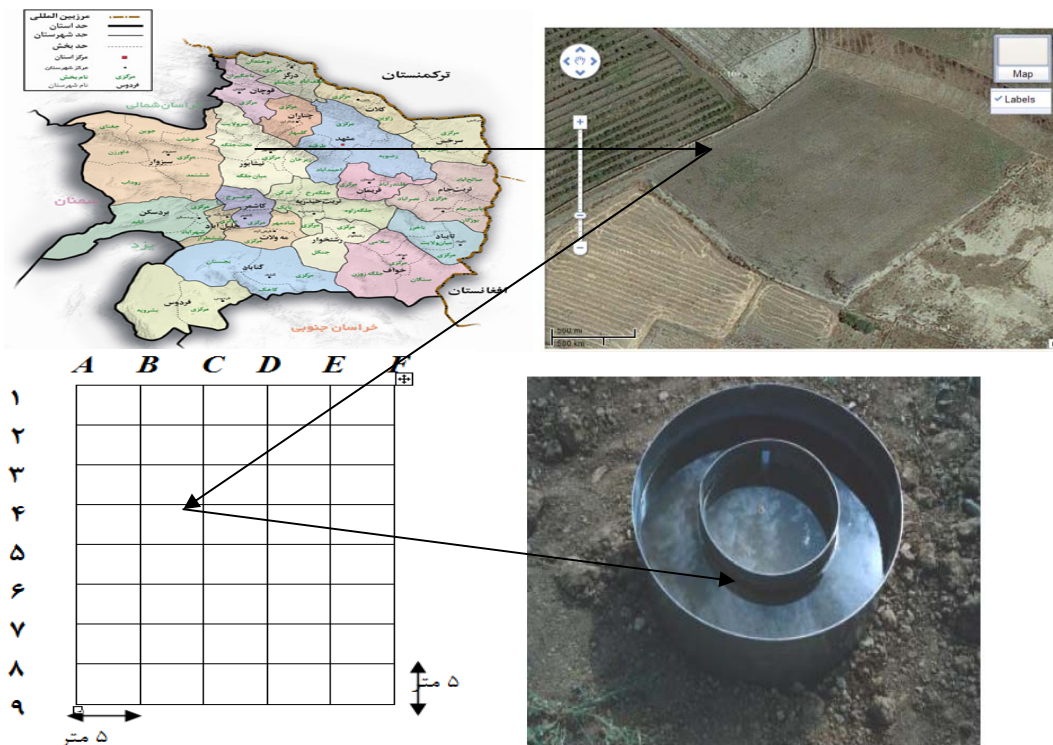
مقایسه ساختمان خاک‌های مختلف با مقایسه بعد فراکتال (D) آنها امکان‌پذیر است؛ مثلاً اگر ذرات کروی خاک منظم چیده شده باشند، $D=3$ است (۹). مقادیر کم بعد فراکتال اندازه ذرات بیانگر حکم‌فرما بودن تعداد کم ذرات بزرگ در توزیع اندازه ذرات و مقادیر زیاد آن بیانگر حکم‌فرما بودن تعداد زیاد ذرات ریز در توزیع اندازه ذرات می‌باشد. به عبارت دیگر هر چه بافت خاک سبکتر باشد، مقدار بعد فراکتال اندازه ذرات کمتر خواهد بود و بالعکس (۲۱). وجود خاکدانه‌ها (تعداد/جرم) مبین ساختمان خاک است، و هر چه تعداد/جرم خاکدانه‌ها بیشتر باشد، ساختمان بهتر می‌شود (۹).

مطالعات اخیر همچنین پیشنهاد می‌کند که جریان سیستم‌های غیر اشباع پیچیده، می‌تواند توسط فراکتال توصیف گردد. هاتانو و بولتینگ (۱۶) اولین نویسندگان علم هیدرولوژی بودند که گزارش کردند الگوهای جریان رنگ در تصاویر دوبعدی از نیمرخ خاک، می‌تواند با هندسه فرکتال مشخص شود. فلوری و فلوهرلر (۱۵) با انجام آزمایش بر سه لایه متشکل از خاک غیراشباع لومی‌رسی نشان دادند که الگوهای شسته شدن املاح می‌تواند به خوبی توسط مدل تجمع محدود انتشار^۱ (۲۷) بیان شود، در این راستا قدر (۱۴) و فلوری و فلوهرلر (۱۵) در تحقیقات خود به تبعیت مدل DLA از الگوهای فراکتال اشاره داشته‌اند. مشاهدات فلوری و فلوهرلر (۱۵) بعدها توسط پرسون و همکاران (۲۳)، که به بررسی اطلاعات راه‌های ورود و نفوذ رنگ به حوزه آب و املاح در شرایط غیر اشباع پرداخته بودند، تأیید گردید. پرسون و همکاران (۲۳) نشان دادند که مشاهدات مزرعه‌ای به خوبی توسط مدل DLA توصیف می‌شود. علاوه بر این، آنها نشان دادند که مشاهده طیف توانی متوسط نفوذ عمقی رنگ، از قانون توانی معمولی پیروی می‌کند که یکی دیگر از نشانه‌های مهم از رفتار فراکتالی جریان نفوذ عمقی است. اولسون و همکاران (۲۰) گزارش کردند که مشاهدات مزرعه‌ای الگوی جریان رنگ در سایت اشباع نشده با الگوی چندفرکتالی توصیف می‌شود. این یافته‌ها با نتایج لیو و مولز (۱۸)، که به چندفرکتالی بودن توزیع‌های مکانی هدایت هیدرولیکی اشاره داشتند، سازگار است.

در این رهگذر برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، که بیانگر بسیاری از خصوصیات خاک می‌باشد، توسط توابع انتقالی و بعد فراکتال اندازه ذرات می‌تواند کمک شایانی در حل مسائل محیط‌های متخلخل کند. با توجه به اینکه تاکنون مطالعه‌ای بر روی توابع انتقالی خاک با استفاده از بعد فراکتال، توسط سامانه‌های تطبیقی عصبی-فازی نشده است، لذا استفاده از این مدل و مقایسه آن نسبت به توابع انتقالی رگرسیون، بر اساس پارامترهای آماری و آنالیز حساسیت می‌تواند راهکار مناسبی برای حل مسائل مربوط به فیزیک خاک ارائه دهد. در این پژوهش با استفاده از پارامترهای چگالی ظاهری، چگالی حقیقی، تخلخل، بعد فراکتال اندازه ذرات، درصد رس، درصد سیلت و درصد شن اقدام به برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع شده است.

2- fragmentation
3- spherical
4- cubic

1- Diffusion Limited Aggregation



شکل ۱- منطقه و زمین مورد آزمایش

مرحله آموزش، با اصلاح پارامترهای درجه عضویت بر اساس میزان خطای قابل قبول، مقادیر ورودی به مقادیر واقعی نزدیک‌تر می‌شوند. روش آموزش اصلی در این سامانه، روش پس انتشار خطا است. در این روش با استفاده از الگوریتم شیب نزولی خطا، مقدار خطا به سمت ورودی‌ها پخش می‌گردد و پارامترها تصحیح می‌شوند. نکاتی که در مورد آموزش شبکه عصبی - فازی باید به آن‌ها توجه نمود عبارتند از: اطلاعاتی که برای آزمون و آموزش انتخاب می‌شوند باید به صورت تصادفی انتخاب شوند؛ مدل توانایی شبیه‌سازی اطلاعاتی که خارج از دامنه اطلاعات آموزش باشد را ندارد؛ اطلاعات ورودی به مدل برای حصول نتایج بهتر باید نرمال شوند و هر چه تعداد داده‌های آموزش مدل بیشتر باشد، مدل بهتر آموزش می‌بیند (۵).

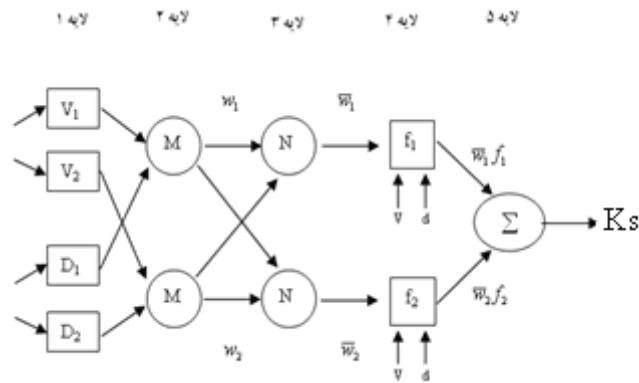
معیارهای ارزیابی

در این تحقیق برای ارزیابی کارایی مدل‌های رگرسیونی که توسط نرم افزار SPSS16 به دست آمد و سامانه استنتاج تطبیقی عصبی - فازی ارائه شده برای تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از خصوصیات فیزیکی خاک، از معیارهای ضریب تعیین R^2 ، ریشه میانگین مربع خطا RMSE، ریشه میانگین مربع خطا نرمال شده NRMSE و میانگین خطای مطلق MAE استفاده گردید. روابط مربوط به این آماره‌ها بصورت زیر می‌باشد.

$$\sum_{x=1}^x \frac{M(x)}{x^3} = k_c x^{-D_m}, k_c = k \rho \quad (5)$$

سامانه استنتاج تطبیقی عصبی - فازی^۱

این سیستم از الگوریتم‌های شبکه عصبی و منطق فازی، به منظور طراحی نگاشت غیر خطی بین فضای ورودی و خروجی استفاده می‌کند. سامانه استنتاج تطبیقی عصبی - فازی شبکه‌ای ۵ لایه‌ای، متشکل از گره‌ها و کمان‌های اتصال دهنده گره‌ها می‌باشد. ساختار مناسب سامانه عصبی - فازی، متناسب با داده‌های ورودی، درجه عضویت، قوانین و توابع درجه عضویت خروجی انتخاب می‌شود. شکل ۲ نمایشی از معماری شبکه عصبی - فازی با چهار ورودی، یک خروجی و دو قانون می‌باشد. در لایه اول (ورودی)، میزان تعلق هر ورودی به بازه‌های مختلف فازی، توسط کاربر مشخص می‌شود. 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 (w_i) انجام می‌گیرد. لایه چهارم، لایه قوانین است که از انجام عملیات بر روی پیام‌های ورودی به این لایه حاصل ($w_i \times f_i$) می‌شود. لایه آخر، خروجی شبکه (f) می‌باشد که هدف آن حداقل نمودن اختلاف خروجی به دست آمده از شبکه و خروجی واقعی است. در



شکل ۲- ساختار سامانه استنتاج تطبیقی عصبی- فازی

در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۳ دو مورد از نمونه‌ها دارای بافت لومی‌شنی، ۲۸ مورد دارای بافت لوم و ۲۴ مورد دارای بافت سیلت‌لوم هستند. زرین‌فر (۴) نیز در تحقیق خود به تغییر پذیری بافت خاک در مساحت ۲۴ در ۲۴ متر اشاره داشته است. به طوری‌که در این شبکه بندی ۴ بافت متفاوت خاک (شنی لومی، لومی- شنی، لوم و سیلت‌لوم) مشاهده گردید. همچنین نتایج مربوط به اندازه‌گیری چگالی ظاهری مشخص نمود که چگالی ظاهری نقاط بین ۱/۱۹ الی ۱/۷۴، با میانگین ۱/۴۹ (شکل ۳) و چگالی حقیقی نیز بین ۲ الی ۳، با میانگین ۲/۵ می‌باشد. ضمن اینکه مقادیر رطوبت اولیه در تمام نقاط، به دلیل اینکه در طی مراحل انجام آزمایش بارندگی و آبیاری صورت نگرفته بود، تقریباً یکسان بوده و مقدار تغییرپذیری آن بسیار کم و در حدود ۰/۰۸ می‌باشد. مقادیر درصد شن، درصد سیلت و درصد رس نیز به ترتیب در بازه ۲۸ الی ۵۶، ۳۲ الی ۶۲ و ۵ الی ۲۶ متغیر است.

بعد فراکتال

بعد فراکتال اندازه ذرات نیز توسط روش الک خیس و روابط ۱ تا ۵، برای دو حالت ذرات کروی و ذرات مکعبی تعیین شد و مقادیر آنها در جدول ۱ آورده شده است. همانطور که در جدول ۱ نیز مشخص است، بعد فراکتال اندازه ذرات کروی و ذرات مکعبی یکسان بوده و اختلاف چندانی نسبت به هم ندارند. همچنین میزان تغییرات بعد فراکتال در ۵۴ نقطه مورد آزمایش کم بوده و در بازه ۲/۲۶ تا ۳/۰۶ تغییر می‌کند. در همین راستا پرفکت و همکاران (۲۱) به تغییرپذیری بعد فراکتال در بازه ۰/۶۷ تا ۳/۹۲ اشاره داشتند.

این تفاوت در مقادیر بعد فراکتال حاصل از این تحقیق و تحقیق پرفکت و همکاران (۲۱) به دلیل تفاوت در بافت خاک‌های مورد بررسی است؛ بطوریکه در این تحقیق تنها سه بافت لومی‌شنی، لوم و سیلت‌لوم مورد بررسی قرار گرفت، در حالی که در مطالعه پرفکت و همکاران (۲۱) بافت‌های شن و رسی نیز مورد بررسی قرار گرفتند.

$$R^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) \right)^2}{\left(\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \right) \left(\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \right)} \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (7)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i}{n} \right)} \quad (8)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - Y_i|}{n} \quad (9)$$

که در این روابط، X_i و Y_i ، i امین داده واقعی و برآورد شده، \bar{X} و \bar{Y} میانگین داده‌های X_i و Y_i و n تعداد نمونه‌های ارزیابی می‌باشد. ضمن اینکه برای درک شهودی بهتر نتایج، مقایسه نسبت به خط ۱:۱ نیز انجام پذیرفت.

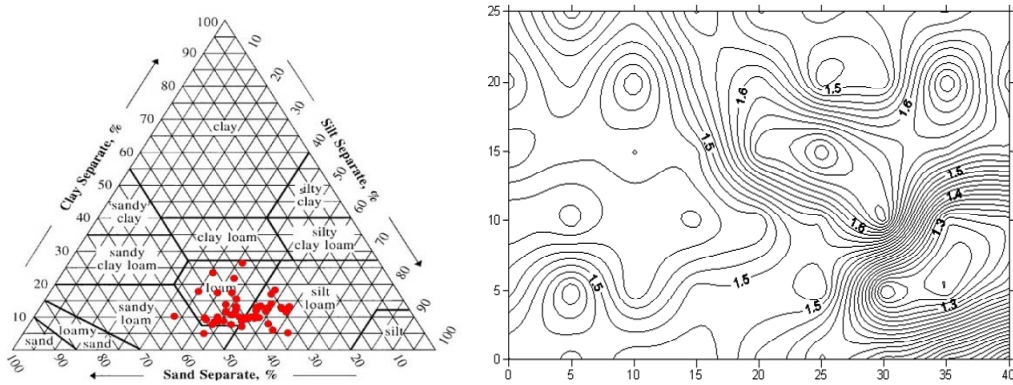
آنالیز حساسیت

در اکثر توابع انتقالی خصوصیات از خاک استفاده می‌شوند که برداشت و ثبت آنها در معرض خطاهای انسانی و سیستماتیکی قرار دارد؛ لذا بررسی تأثیر تغییرات این عوامل، در تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع توسط تابع انتقالی، ضروری به نظر می‌رسد. بر این اساس سعی شد با ایجاد تغییرات ± 10 ، ± 20 و ± 30 درصد در مقادیر پارامترهای چگالی ظاهری، چگالی حقیقی، درصد شن، درصد رس، درصد سیلت، تخلخل و بعد فراکتال اندازه ذرات، حساسیت توابع انتقالی ارائه شده در این تحقیق در اثر تغییرات پارامترهای ورودی در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع مورد ارزیابی قرار گیرد.

نتایج و بحث

مشخصات خاک

محل قرارگیری نمونه‌های خاک در هر نقطه در مثلث بافت خاک



شکل ۳- محل قرارگیری نمونه خاک هر نقطه در مثلث بافت خاک و چگالی ظاهری در زمین مورد آزمایش

رگرسیون چند متغیره

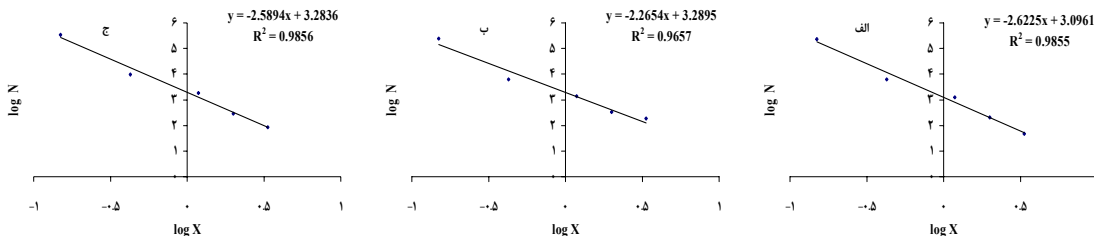
بهترین مدل رگرسیونی برای تابع انتقالی، بر اساس حداقل سازی تابع هدفی (معادله ۱۰) که براساس پارامترهای آماری R^2 ، RMSE و MAE بنا نهاده شده بود، انتخاب گردید. لازم به ذکر است که ضرایب تابع هدف بر اساس اهمیت آنها در ارزیابی مدل انتخاب گردید. در نهایت با توجه به تابع هدف، رابطه تابع انتقالی به صورت معادله ۱۱ به دست آمد. در این معادله پارامترهای S_a ، ρ_b ، D ، n و S به ترتیب بیانگر درصد شن، چگالی ظاهری، چگالی حقیقی، بعد فراکتال اندازه ذرات، تخلخل و درصد سیلت می باشند. در معادله ۱۱ به دلیل وجود همبستگی خطی بین درصد شن و درصد رس، تنها مقدار درصد شن انتخاب گردید؛ چراکه ضریب همبستگی پیرسون آن با هدایت هیدرولیکی اشباع نسبت به درصد رس بالاتر بود.

همانطور که از تعریف بعد فراکتال اندازه ذرات مشخص است، این بعد تابعی از بافت خاک بوده و در خاک‌های با بافت سنگین بیش از خاک‌های با بافت سبک است. پرفکت و همکاران (۲۱) نیز به این امر اشاره داشتند؛ به طوری که در مطالعه آنها مقادیر بزرگ بعد فراکتال (بیش از ۳) مربوط به بافت رسی و مقادیر کم بعد فراکتال (کمتر از ۲) مربوط به بافت شنی بود. در همین راستا خاک‌هایی با بعد فراکتال زیاد دارای هدایت هیدرولیکی اشباع کمتر نسبت به خاک‌هایی با بعد فراکتال کوچکتر هستند.

شکل ۴ نیز نشان دهنده رابطه خطی بین لگاریتم تعداد ذرات بزرگتر از یک قطر مشخص با اندازه قطر ذرات، برای سه نمونه خاک با بافت‌های متفاوت می باشد. همانطور که در شکل ۴ نیز مشخص است، ضریب تبیین معادله خط برای هر سه بافت مقدار قابل قبولی است. ضمن اینکه در شکل ۴ ضریب پارامتر X برابر بعد فراکتال اندازه ذرات می باشد.

جدول ۱- مقادیر میانگین، حداکثر، حداقل و انحراف معیار بعد فراکتال اندازه ذرات برای دو حالت ذرات کروی و مکعبی

شکل ذرات		پارامتر
مکعبی	کروی	
۲/۵۱۴۲	۲/۵۱۴	میانگین
۳/۰۶	۳/۰۶	حداکثر
۲/۲۶۱	۲/۲۶	حداقل
۰/۱۲۳	۰/۱۲۴	انحراف معیار

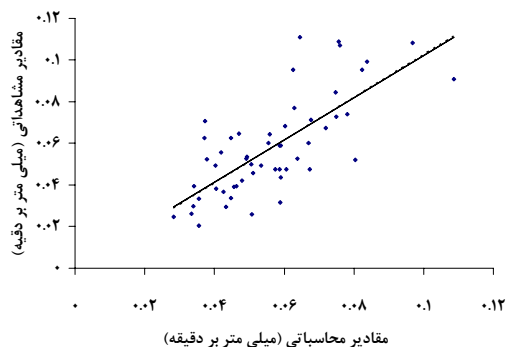


شکل ۴- رابطه خطی بین لگاریتم تعداد ذرات بزرگتر از قطر مشخص اندازه ذرات با قطر ذرات و محاسبه بعد فراکتال، (الف) بافت سیلت لوم، (ب) بافت لوم و (ج) بافت شنی لوم

نفوذپذیری خاک در فیلیپین استفاده کرد. شبکه مورد استفاده در تحقیق وی دارای ضریب تبیین بالایی با میانگین ۰/۹۱۱ بود. نخعی (۷) نیز کارایی مدل شبکه عصبی مصنوعی را برای تخمین مقدار ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از منحنی اندازه گیری شده دانه بندی مورد بررسی قرار داد.

جدول ۲- پارامترهای آماری توابع انتقالی

روش	RMSE	MAE	NRMSE
تابع انتقالی ارائه شده در این تحقیق	۰/۱۷	۰/۱۲	۰/۹۶
کاسبی و همکاران (۱۹۹۴)	۰/۳۶	۰/۳۵	۶/۵
برانکسیک و همکاران (۱۹۸۴)	۰/۲۲	۰/۰۸۵	۵۰/۴
جبرو (۱۹۹۲)	۲/۱	۰/۸۵	۱۷/۴
پوکت و همکاران (۱۹۸۵)	۰/۳۹	۰/۰۳۲	۹/۵
دین پوکت (۱۹۹۴)	۰/۰۶۴	۰/۰۵۱	۴/۷
ساکستون و همکاران (۱۹۸۶)	۰/۰۳۲	۰/۰۲۵	۶/۱



شکل ۵- مقایسه مقادیر واقعی و برآورد شده هدایت هیدرولیکی

اشباع عمودی. خط ممتد بیانگر خط رگرسیون و خط منقطع بیانگر خط ۱:۱ می باشد.

تحقیق وی بر روی پنج نوع خاک مختلف انجام شد. نتایج به دست آمده از تحقیق وی نشان داد که در صورت استفاده از درصد عبور کرده از الک ذرات تشکیل دهنده مواد آبخوان به عنوان نرون های ورودی به شبکه و لگاریتم هدایت هیدرولیکی به عنوان نرون خارجی از شبکه و استفاده از تابع انتقال لگاریتم سیگموئید در لایه مخفی، تخمین مورد اطمینان و قابل قبولی از مقدار هدایت هیدرولیکی به دست می آید (۷).

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 (معادله ۱۱) است. بهینه بودن شبکه عصبی نسبت به توابع رگرسیونی از سوی وستن و همکاران (۲۸) نیز گزارش شده است. آنها اشاره کردند که هنگامی که بیش از سه ورودی وجود داشته باشد معمولاً شبکه های عصبی مصنوعی بهتر از روش های رگرسیونی عمل می کنند.

این درحالی است که تابع انتقالی ارائه شده از سوی نوایان و همکاران (۸)، با پارامترهای ورودی چگالی ظاهری، تخلخل موثر، میانگین هندسی قطر ذرات و انحراف معیار آنها شکل گرفته بود و مقدار R^2 در تابع انتقالی ارائه شده از سوی آنها برابر ۰/۶۱ می باشد.

$$0.4 * (1 - R^2) + 0.2 * (RMSE) + 0.4 * (MAE) = \min \quad (10)$$

$$K_s = \frac{0.22 * S_a + 0.08 * \rho_b}{(5 * D) + (2.6 * n^{0.0295}) + (2.755 * S) + (4.33 * \rho_s)} \quad (11)$$

نتایج مربوط به آماره های تابع انتقالی (معادله ۱۱) و چند تابع انتقالی ارائه شده از سوی سایر محققین (۴، ۱۲، ۱۷ و ۲۵) در جدول ۲ نشان داده شده است. همانطور که در جدول ۲ نیز مشخص است، تابع ارائه شده در این تحقیق نسبت به سایر توابع دقت بسیار خوبی دارد. ضریب تبیین (R^2) معادله ارائه شده برابر ۰/۶۵ می باشد؛ این درحالی است که ضریب تبیین در تابع ارائه شده از سوی زرین فر (۴)، در بهترین حالت دارای ضریب تبیین ۰/۴ بوده است. این بهبود نسبی در نتایج می تواند به دلیل استفاده از بعد فراکتال اندازه ذرات در برآورد تابع انتقالی باشد؛ زیرا در اغلب موارد ورودی های توابع جدول ۲ با مدل فوق یکی بوده و تنها تفاوت در استفاده از بعد فراکتال می باشد. برای ارائه تصویر روشنی از عملکرد تابع انتقالی در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع، مقادیر اندازه گیری شده هدایت هیدرولیکی اشباع در بالای سطح ایستابی، برحسب میلی متر در دقیقه، در مقابل مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع به دست آمده توسط تابع انتقالی (معادله ۱۱) در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۲ و شکل ۵، تابع انتقالی (معادله ۱۱) از دقت تقریباً خوبی برخوردار بوده و در بدترین حالت تفاوت بین هدایت هیدرولیکی واقعی با مقدار برآورد شده توسط تابع انتقالی برابر ۰/۰۳ میلی متر در دقیقه می باشد. تابع انتقالی ارائه شده در معادله ۱۱ در ۲۳ مورد مقدار هدایت هیدرولیکی را کمتر از واقعیت و در ۳۱ مورد بیشتر از واقعیت برآورد می کند.

شبکه عصبی- فازی

ساختار بهینه مدل سامانه استنتاج تطبیقی عصبی- فازی از بین تمامی آرایش ها و دیگر توابع محرک که دارای بهترین عملکرد بود، در جدول ۳ معرفی شده است. همان طور که در جدول ۳ نیز پیداست، شبکه استنتاج تطبیقی عصبی- فازی با ۴ لایه در ورودی، شامل چگالی ظاهری، چگالی حقیقی، تخلخل و بعد فراکتال اندازه ذرات و یک لایه خروجی شکل گرفته است. در مدل ارائه شده اندازه گامها ۰/۳ و مقدار ضریب مومتم بهینه برابر ۰/۹ در نظر گرفته شد. در مدل عصبی- فازی ارائه شده در این تحقیق، مقدار R^2 در مرحله آموزش و آزمون به ترتیب برابر ۰/۸۸ و ۰/۸۶ بوده و مقادیر RMSE نیز به ترتیب برابر ۰/۰۱۲ و ۰/۰۲ می باشد (جدول ۳). در همین راستا نستور (۱۹) از مدل شبکه عصبی پرسپترون چندلایه در پیش بینی

جدول ۳- ساختار و مقادیر پارامترهای سامانه استنتاج تطبیقی عصبی- فازی

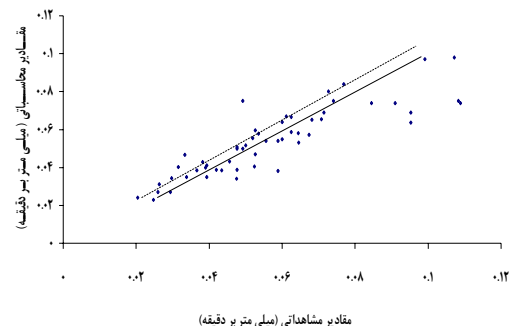
آموزش			آزمون				تابع محرک	قانون یادگیری	آرایش شبکه
MAE	NRMSE	RMSE	R ²	MAE	NRMSE	RMSE	R ²		
۰/۰۰۹	۰/۵۲	۰/۰۱۲	۰/۸۸	۰/۰۱۷	۰/۸۲	۰/۰۲	۰/۸۶	تائزات هایپرپولیک مومتم ۴-۱-۱	

حساسیت موجود در جدول ۴، تابع انتقالی رگرسیونی کمترین حساسیت را نسبت به تغییرات در تخلخل و بعد فراکتال اندازه ذرات دارد؛ در مقابل بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات در مقادیر چگالی ظاهری، درصد سیلت و درصد شن دارد. با توجه به جدول ۴ مدل استنتاج تطبیقی عصبی- فازی حساسیت کمتری نسبت به پارامترهای ورودی، در مقایسه با تابع انتقالی رگرسیونی دارد. همانند تابع رگرسیونی، مدل استنتاج تطبیقی عصبی- فازی نسبت به تغییرات در p_b بیشتر از سایر متغیرها حساس می‌باشد. حساسیت مدل‌های فوق به چگالی ظاهری با توجه به این که می‌توان با کمی دقت در اندازه-گیری چگالی ظاهری از بروز هر گونه خطا جلوگیری کرد، یک مزیت برای این مدل‌ها می‌باشد. همچنین حساسیت کم این مدل‌ها به بعد فراکتال اندازه ذرات، با توجه به امکان بروز خطا در محاسبه آن، به عنوان مزیت این توابع به حساب می‌آید. باید متذکر شد در مواردی که در برداشت پارامترهای ورودی احتمال بروز خطاهای انسانی و سیستماتیک وجود دارد، روش استنتاج تطبیقی عصبی- فازی به دلیل حساسیت کمتر به تغییرات در پارامترهای ورودی و همچنین نبود پارامترهای درصد شن، رس و سیلت در لایه‌های ورودی آن، نسبت به تابع انتقالی رگرسیونی (معادله ۱۱) مناسب‌تر می‌باشد. نتایج آنالیز حساسیت نستور (۲۰) بر روی ورودی‌های مدل شبکه عصبی پرسپترون چندلایه در پیش‌بینی نفوذپذیری خاک نشان داد که رطوبت خاک و هدایت هیدرولیکی فاکتورهای مؤثر در پیش‌بینی مدل نفوذ با استفاده از شبکه‌های عصبی می‌باشند.

ارزیابی نهایی مدل‌ها

توانایی توابع انتقالی ارائه شده در این پژوهش برای محاسبه هدایت هیدرولیکی، توسط ۵ خاک دارای بافت رسی که در محاسبه این توابع دخالت نداشتند مورد سنجش قرار گرفت. شکل ۷ بیانگر مقایسه مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع (میلی‌متر در دقیقه) محاسبه شده توسط توابع انتقالی رگرسیونی (۷ الف) و شبکه عصبی- فازی (۷ ب) نسبت به خط ۱:۱ است. همان‌طور که در شکل ۷ نیز کاملاً مشهود است، هر دو تابع انتقالی ارائه شده در این تحقیق در خاک‌های دارای بافت سنگین دقت چندان خوبی ندارند؛ ضمن اینکه برآوردهای مدل عصبی- فازی بهتر از نتایج مربوط به تابع انتقالی رگرسیونی می‌باشد (شکل ۷).

در ادامه، برای ارائه تصویری روشن از دقت برآوردها توسط سامانه استنتاج تطبیقی عصبی- فازی، مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع عمودی (بر حسب میلی‌متر در دقیقه) برآورد شده توسط شبکه معرفی شده در مقابل مقادیر واقعی هدایت هیدرولیکی اشباع عمودی (بر حسب میلی‌متر در دقیقه) در شکل ۶ نشان داده شده است. شکل ۶ از لحاظ ظاهری معرف دقت مدل پیشنهادی است. همچنین بالا بودن ضرایب همبستگی نیز نشان دهنده وابستگی بسیار نزدیک مقادیر مشاهداتی و برآوردی می‌باشد. شایان ذکر است که قابلیت اتکا به برآوردها در پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع از طریق خصوصیات فیزیکی خاک و ضریب همبستگی بین نتایج، قابل ارزیابی است. نتایج موجود در شکل ۶ و جدول ۳ بیانگر بهتر بودن مدل عصبی- فازی نسبت به تابع انتقالی رگرسیونی (معادله ۱۱) می‌باشد؛ ضمن اینکه کمتر بودن داده‌های ورودی در این مدل نسبت به مدل رگرسیونی، یعنی استفاده نکردن از داده‌های درصد شن، سیلت و رس در ورودی مدل، می‌تواند باعث کاهش زمان و هزینه‌های مربوط به آزمایش هیدرومتری برای محاسبه درصد شن، سیلت و رس گردد.



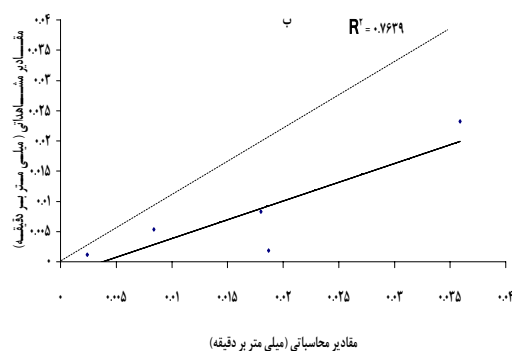
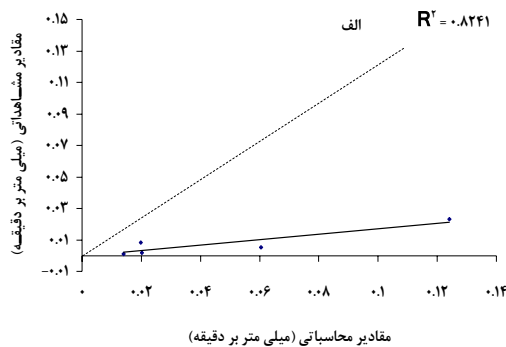
شکل ۶- مقادیر مشاهداتی و تخمینی هدایت هیدرولیکی اشباع عمودی. خط ممتد بیانگر خط رگرسیونی و خط منقطع بیانگر خط ۱:۱ می‌باشد.

آنالیز حساسیت

همانطور که قبلاً ذکر شد، حساسیت مدل‌های فوق با ± 20 و ± 30 درصد تغییر در پارامترهای ورودی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تغییرات در قالب درصد تغییرات در فراسنج‌های آماری MAE و RMSE، در جدول ۴ نشان داده شده است. باید متذکر شد که حروف D و n موجود در جدول ۴ بیانگر تغییرات در چگالی ظاهری، چگالی حقیقی، درصد سیلت، درصد شن، بعد فراکتال اندازه ذرات و تخلخل می‌باشد. با توجه به نتایج آنالیز

جدول ۴- نتایج مربوط به آنالیز حساسیت برای مدل رگرسیونی و سامانه استنتاج تطبیقی عصبی- فازی

مدل تابع انتقالی			پارامتر آماری			مدل رگرسیونی			
S			ρ_s			ρ_b			
$\pm 3\sigma$	$\pm 2\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 3\sigma$	$\pm 2\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 3\sigma$	$\pm 2\sigma$	$\pm 1\sigma$	
-/۰.۲۵	-/۰.۲۳	-/۰.۲۱	-/۰.۱۸۵	-/۰.۱۸	-/۰.۱۷	-/۰.۲۷	-/۰.۲۴	-/۰.۲۳۱	RMSE
-/۰.۲	-/۰.۱۸	-/۰.۱۶	-/۰.۱۵	-/۰.۱۴	-/۰.۱۳	-/۰.۱۹	-/۰.۱۷۴	-/۰.۱۷۳	MAE
n			S_a			D			
$\pm 3\sigma$	$\pm 2\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 3\sigma$	$\pm 2\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 3\sigma$	$\pm 2\sigma$	$\pm 1\sigma$	
-/۰.۱۸	-/۰.۱۷۵	-/۰.۱۷	-/۰.۲۳	-/۰.۱۹	-/۰.۱۷	-/۰.۱۸	-/۰.۱۷۵	-/۰.۱۷	RMSE
-/۰.۱۳	-/۰.۱۲۵	-/۰.۱۲	-/۰.۱۹	-/۰.۱۷	-/۰.۱۳۶	-/۰.۱۴	-/۰.۱۳	-/۰.۱۲۴	MAE
n			ρ_s			ρ_b			
$\pm 3\sigma$	$\pm 2\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 3\sigma$	$\pm 2\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 3\sigma$	$\pm 2\sigma$	$\pm 1\sigma$	
-/۰.۱۷	-/۰.۱۵۲	-/۰.۱۲۹	-/۰.۱۶	-/۰.۱۳۹	-/۰.۱۲۸	-/۰.۲۲	-/۰.۱۵۸	-/۰.۱۲۴	RMSE
-/۰.۱۲۵	-/۰.۱۱	-/۰.۰۹۵	-/۰.۱۳	-/۰.۱۲	-/۰.۱	-/۰.۱۵	-/۰.۱۳	-/۰.۱۱	MAE
D									
$\pm 3\sigma$	$\pm 2\sigma$	$\pm 1\sigma$							
-/۰.۱۴۵	-/۰.۱۳۱	-/۰.۱۲۴							RMSE
-/۰.۱۲	-/۰.۱	-/۰.۰۹							MAE



شکل ۷- مقایسه نسبت مقادیر برآورد شده و مقادیر واقعی هدایت هیدرولیکی عمودی خاک با بافت رسی برای الف) مدل رگرسیونی و ب) مدل عصبی- فازی. خط ممتد بیانگر خط رگرسیونی و خط منقطع بیانگر خط ۱:۱ می‌باشد.

نتیجه‌گیری

هدایت هیدرولیکی اشباع از خصوصیات بنیادین خاک است که تبیین آن برای مدل‌سازی جریان آب در خاک، به‌ویژه در حالت اشباع بسیار مهم می‌باشد. هر چند روش‌هایی برای اندازه‌گیری مستقیم این ویژگی پیشنهاد شده است، لیکن این روش‌ها همچنان پرهزینه و زمان‌بر هستند. تابع انتقالی رگرسیونی ارائه شده با ورودی‌های درصد شن، چگالی ظاهری، چگالی حقیقی، بعد فراکتال اندازه ذرات، تخلخل و درصد سیلت، از دقت خوبی در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع برخوردار می‌باشد. با توجه به نتایج آنالیز حساسیت، تابع انتقالی

این دقت کم در برآوردها را می‌توان در پیروی نکردن خاک‌های رسی از قوانین مربوط به نفوذ، به‌دلیل وجود لایه سله، درز و شکاف، انبساط و انقباض رس (۱)، جستجو کرد. بیشترین خطا در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌های دارای بافت رسی (شکل ۷) توسط توابع انتقالی رگرسیونی (معادله ۱۱) و مدل عصبی- فازی به‌ترتیب برابر ۰/۰۵۵ و ۰/۰۳ می‌باشد. همچنین مقادیر NRMSE به‌ترتیب برای تابع رگرسیونی و مدل عصبی- فازی برابر ۱۴/۷ و ۲/۹۳ می‌باشد، نتایج این آماره نیز بهتر بودن مدل عصبی- فازی نسبت به تابع رگرسیونی را بیان می‌کند.

در این مدل نسبت به مدل رگرسیونی، یعنی استفاده نکردن از داده‌های درصد شن، سیلت و رس در ورودی مدل، می‌تواند باعث کاهش زمان و هزینه‌های مربوط به آزمایش هیدرومتری برای محاسبه درصد شن، سیلت و رس گردد. هر دو تابع انتقالی ارائه شده در این تحقیق در خاک‌های دارای بافت سنگین دقت چندان خوبی ندارند؛ ضمن اینکه برآوردهای مدل عصبی - فازی بهتر از نتایج مربوط به تابع انتقالی رگرسیونی می‌باشد. نتایج نشان داد که دقت برآورد توابع انتقالی به‌دست آمده برای تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع، در خاک‌هایی با بافت سبک تا متوسط (لومی‌شنی، لوم و سیلت‌لوم)، مناسب می‌باشد؛ به گونه‌ای که می‌توان از آن در تخمین‌های اولیه معیارهای لازم برای طراحی پروژه‌های آبیاری، زهکشی و مهندسی منابع آب استفاده نمود.

رگرسیونی کمترین حساسیت را نسبت به تغییرات در تخلخل و بعد فراکتال اندازه ذرات دارد؛ در مقابل بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات در مقادیر چگالی ظاهری، درصد سیلت و درصد شن 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. در مورد توابع انتقالی خاک، این ساختار را می‌توان به صورت یک تابع خطی فازی که پارامترهای آن اعداد فازی تبیین می‌شوند، در نظر گرفت. بالا بودن ضرایب همبستگی و کم بودن ضرایب $RMSE$ ، $nRMSE$ و MAE نشان دهنده وابستگی بسیار نزدیک مقادیر مشاهداتی و برآوردی توسط شبکه معرفی شده می‌باشد. شایان ذکر است که قابلیت اتکا به برآوردها در پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع از طریق خصوصیات فیزیکی خاک و ضریب همبستگی بین نتایج، قابل ارزیابی است. کمتر بودن داده‌های ورودی

منابع

- ۱- بای‌بوردی م. ۱۳۸۵. فیزیک خاک. چاپ هشتم، انتشارات دانشگاه تهران. تهران.
- ۲- دزفولی ک.ا. ۱۳۸۴. اصول تئوری فازی و کاربردهای آن در مدل سازی مسائل مهندسی آب. چاپ اول انتشارات جهاد دانشگاهی واحد امیرکبیر.
- ۳- رضایی ع. و سلطانی ا. ۱۳۷۷. مقدمه‌ای بر تحلیل رگرسیون کاربردی. مرکز نشر دانشگاه اصفهان. اصفهان.
- ۴- زرین فر س. ۱۳۸۸. ارزیابی توابع انتقالی ارائه شده برای تبیین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با استفاده از مقادیر اندازه گیری شده در مزرعه. پایان نامه دوره کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی. دانشگاه فردوسی مشهد.
- ۵- سبزی‌پرور ع.ا.، زارع‌ایبانه ح. و بیات ورکشی م. ۱۳۸۹. مقایسه یافته‌های مدل شبکه استنتاج تطبیقی عصبی - فازی با مدل‌های رگرسیونی به منظور برآورد دمای خاک در سه اقلیم متفاوت. نشریه آب و خاک ۲۴ (۲): ۲۷۴-۲۸۵.
- ۶- محمدی ج. و طاهری س.م. ۱۳۸۴. برازش توابع انتقالی خاک با استفاده از رگرسیون فازی. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۲: ۶۰۰-۵۱.
- ۷- نخعی م. ۱۳۸۳. تخمین ضریب هدایت هیدرولیکی خاک‌های اشباع توسط شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از منحنی دانه‌بندی. مجله علوم جمهوری اسلامی ایران ۱۶(۱): ۶۲-۵۵.
- ۸- نوابیان م.، لیاقت ع.م. و همایی م. ۱۳۸۲. تبیین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با استفاده از توابع انتقالی. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی ۴(۱۶): ۱-۱۲.
- 9- Arya L.M., and Paris J.F. 1981. A physicoempirical model to predict soil moisture characteristics from particle-size distribution and bulk density data. Soil Sci. Soc. Am. J, 45: 1023-1030.
- 10- Bouma J. 1989. Using soil survey data for quantitative land evaluation Adv. Soil Sci. Soc. Am. J, 9: 177-213.
- 11- 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. Jiseph, Mi.
- 12- Casby B.J., Hornberger G.M., Glapp R.B., and Ginn T.R. 1984. A statistical exploration of the relation ships of soil moisture characteristics to the physical properties of soil. Water Resour. Res. J, 20(6): 682-690.
- 13- Frate F.D., Ferrazoli P., and Schiavon G. 2003. Retrieving soil moisture and agricultural variables by microwave radiometry using neural network. Remote Sensing of Environment. J, 84:174-183.
- 14- Feder J. 1988. Fractals. Plenum Press, New York.
- 15- Flury M., and Fluhler H. 1995. Modeling solute leaching in soils by diffusion-limited aggregation: basic concepts and applications to conservative solutes. Water Resour. Res. J, 31: 2443- 2452.
- 16- Hatano R., and Booltink H.W.G. 1992. Using fractal dimensions of stained flow patterns in a clay soil to predict bypass flow. Hydrol. J, 135: 121-131.
- 17- Jabro S.D. 1992. Estimation of saturated hydraulic conductivity of soil from particle size distribution and bulk density data. Trans, ASAE, 35 (2):557-560.
- 18- Liu H.H., Molz F.J. 1997. Multifractional analyses of hydraulic conductivity distribution. Water Resour. Res. 33:

- 2483-2488.
- 19- Nestor S.Y. 2006. Modelling the infiltration process multi-layer perceptron artificial network. *Hydrol. Sci. J*, 51(1): 3-20.
 - 20- Olsson J., Persson M., Albergel J., Berndtsson R., Zante P., Ohrstrom P., and Nasri S. 2002. Multiscaling analysis and random cascade modeling of dye infiltration. *Water Resour. Res. J*, 38 (11): 1263.
 - 21- Perfect E., Rasiah V., and Kay B.D. 1992. Fractal dimensions of soil aggregate-size distributions calculated by number and mass. *Soil Sci. Soc. Am. J*, 56: 1407-1409.
 - 22- 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.
 - 23- Persson M., Yasuda H., Albergel H., Berndtsson R., Zante P., Nasri S., and Ohrstrom P. 2001. Modeling plot scale dye penetration by a diffusion limited aggregation (DLA) model. *Hydrol. J*, 250: 98- 105.
 - 24- Puckett W.E., Dane S.H., and Hajek B.F. 1985. Physical and mineralogical to determine soil hydraulic properties. *Soil Sci, Soc. Am. J.* 49:831-836.
 - 25- 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.
 - 26- Tang L., Zeng G.M., Nourbakhsh F., and Shen G.L. 2008. Artificial neural network approach for predicting cation exchange capacity in soil based on physico-chemical properties. *Environ. Eng. Sci. J*, 26(2): 1-10.
 - 27- Witten T.A., and Sander L.M. 1981. Diffusion-limited aggregation: a kinetic critical phenomenon. *Phys. Rev. Lett.* 47: 1400-1403.
 - 28- Wosten S.H.M., Pachepsky Y.A., and Rawls W.J. 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology*, 251:123-150.



Using Fractal Dimension of Particle Size in Estimating Saturated Hydraulic Conductivity

V. Yazdani^{1*} - B. Ghahreman² - K. Davari³ - M.E. Fazeli⁴

Received:6-2-2011

Accepted:12-2-2012

Abstract

One of the important aspects of soil is, knowing the relationships between spatial features of soil and quantity in statistical model. The goal of this research is to estimate saturated hydraulic conductivity by regression and Co-Active Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) with using the parameters of Bulk density, real density, porosity, Fractal dimension of particle size, and clay percent, silt percent, sand percent. So experiment related to saturated hydraulic conductivity calculation and soil physical properties calculation of soil in 54 points which were specified 5 by 5 meters. Also, amount of bulk density based on paraffin Hunk, Fractal dimension of particle size by wet sieve method, the percentage of sand, clay and silt by Hydrometry and saturated hydraulic conductivity above water table by double rings method was measured. The best regression model for Pedo transfer function (PTF) was chosen according to minimized the goal function based on statistical parameters R², RMSE and MAE. Parameters sand and silt percent, bulk density, real density, Fractal dimension of particle size, and porosity were chosen as input. In PTF amount of R², RMSE, NRMSE and MAE, are 0.65, 0.017, 0.96 and 0.012 respectively. ANFIS with four layers input includes bulk density, real density, porosity and Fractal dimension of particle size and an output layer with the best performance. In this research, the amount of R² in the presented ANFIS model in training and test is 0.88 and 0.86 respectively, and RMSE values will be 0.012 and 0.02 respectively. Noticing to sensitivity analysis result, PTF has the least sensitivity than changes in porosity and Fractal dimension of particle size, on the other hand, it has the most sensitivity than changes in the values of bulk density, silt and sand percent. ANFIS model is like PTF is more sensitivity than changes in values of bulk density. In addition, the outcome shows more effect on ANFIS than PTF. Evaluation of models show that estimation in clay soil is not acceptable, in contract contrast its model for estimate saturated hydraulic conductivity in soil texture (lom sandy, lom and silt lom) is suitable.

Keywords: Saturated Hydraulic Conductivity, Fractal Dimension, Soil Physical Characteristics, Co-Active Neuro-Fuzzy Inference System

1,2,3- PhD Student, Professor and Associate Professor of Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Respectively

(*- Corresponding Author: Email: v.yazdany@yahoo.com)

4- MSc Student, Department of Water Engineering, Islamic Azad University, Ferdows Branch