

برآورد سرعت نفوذ نهایی خاک با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی فازی، روش نرو-فازی (ANFIS) و نظام استنتاج فازی (FIS)

(مطالعه موردی: دشت بهشهر - گلوگاه، مازندران)

ایمان صالح^۱، عطاءاله کاویان^{۲*}، زینب جعفریان^۳، رضا احمدی^۴

(تاریخ دریافت: ۹۵/۰۱/۱۸ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۶/۲۷)

چکیده

نفوذ در هیدرولوژی سطحی و زیر سطحی نقش مهمی ایفا کرده و عامل کلیدی در معادلات بارش و رواناب است. استفاده از روش‌هایی که محدودیت‌های روش‌های تئوری و تجربی متداول تعیین روابط نفوذ را نداشته باشد، لزوم انجام آزمایش‌های پرهزینه و زمان‌بر تعیین مقادیر نفوذپذیری را به حداقل رسانده و تخمین مقادیر کاربردی آن را ممکن خواهد ساخت. در همین راستا در این تحقیق، میزان نفوذپذیری خاک در دشت ساحلی بهشهر-گلوگاه واقع در استان مازندران با استفاده از روش فازی، الگوریتم خوشه‌بندی فازی و همچنین شبکه عصبی-فازی انطباقی (نرو-فازی) برآورد گردید به طوری که درصد رطوبت وزنی پیشین خاک، درصد مواد آلی خاک و درصد آهک خاک به عنوان پارامترهای ورودی و سرعت نفوذ نهایی خاک به عنوان پارامتر خروجی مدل‌ها در نظر گرفته شدند و نتایج به دست آمده از این سه روش با مقادیر مشاهده‌ای نفوذ نهایی به روش تک استوانه مورد مقایسه قرار گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده، روش نرو-فازی با میانگین انحراف $0/0042$ سانتی‌متر در دقیقه، میانگین اختلاف $0/67$ سانتی‌متر در دقیقه، ریشه میانگین مربعات خطای $1/21$ سانتی‌متر در دقیقه و ضریب همبستگی $0/92$ بهترین عملکرد را در تخمین سرعت نفوذ نهایی خاک در بین مدل‌های مورد مطالعه نشان داد، در حالی که الگوریتم خوشه‌بندی فازی با میانگین انحراف $0/0075$ ، میانگین اختلاف $2/12$ ، ریشه میانگین مربعات خطای $2/02$ و ضریب همبستگی $0/88$ و سیستم استنتاج فازی با میانگین انحراف $0/016$ ، میانگین اختلاف $2/50$ ، ریشه میانگین مربعات خطای $2/45$ و ضریب همبستگی $0/82$ به ترتیب در رتبه‌های بعد قرار گرفتند. همچنین بیشترین همبستگی میان مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده در مدل نرو-فازی ($R^2=0/85$) مشاهده گردید و پس از آن، مدل‌های الگوریتم خوشه‌بندی فازی ($R^2=0/77$) و سیستم استنتاج فازی ($R^2=0/66$) قرار گرفتند. در پایان این تحقیق پیشنهاد گردیده است تا با تهیه داده‌های بیشتر از مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها و مقادیر نفوذپذیری محدوده مطالعات زمینه تخمین و مقایسه دقیق‌تر مدل‌های مورد مطالعه فراهم گردد.

واژه‌های کلیدی: نفوذپذیری، رطوبت وزنی خاک، ماده آلی، درصد آهک خاک، بهشهر-گلوگاه

۱- دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۲- دانشیار دانشکده منابع طبیعی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری (مکاتبه کننده)

۳- دانشیار دانشکده منابع طبیعی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۴- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

* پست الکترونیک: ataollah.kavian@yahoo.com

مقدمه

نفوذپذیری خاک بیان‌گر چگونگی رفتار خاک در برابر بارش رسیده به سطح خاک است. نفوذ، تعیین‌کننده سرنوشت آب رسیده به سطح خاک بوده و اصلی‌ترین پارامتر در تعیین مقدار تلفات بارش می‌باشد، به همین دلیل کمی کردن پدیده نفوذ آب به خاک در مدیریت حوزه‌های آبخیز از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. نفوذپذیری یکی از ویژگی‌هایی فیزیکی خاک است که تحت تاثیر عوامل مختلفی از قبیل بافت خاک، پوشش گیاهی، ساختمان خاک، فشردگی، میزان لاشبرگ گیاهی ریشه دوانی و هوموس، شیب سطح زمین، رطوبت اولیه و دمای آب و خاک می‌باشد (Baybordi, 1983). تهیه و اجرای طرح‌های توسعه‌ای و برنامه‌ریزی‌های مربوط به حفاظت خاک و مدیریت کمی و کیفی منابع آبی نیازمند درک کامل و کمی‌سازی دقیق فرآیند نفوذ به عنوان یکی از اجزاء مهم و تأثیرگذار چرخه هیدرولوژیکی است (Chahinian *et al.*, 2006; Ghorbani Dashtaki *et al.*, 2009; Lassabatere *et al.*, 2010). همچنین فرآیند نفوذ وظیفه انتقال مقداری از بارش به سیستم خاک برای دسترسی ریشه گیاه را نیز به عهده دارد. از آنجایی که سرعت نفوذ آب در خاک، تعیین‌کننده زمان تداوم آبیاری برای ذخیره نمودن مقدار مشخصی آب در داخل خاک بوده از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. در حقیقت نفوذ آب در خاک یکی از حساس‌ترین پارامترهای هیدرولیکی موثر بر آبیاری سطحی و یکی از مشکل‌ترین پارامترهایی است که بایستی برآورد شود (Sohrabi & Paydar, 2005). کاهش سرعت نفوذ دلیل اصلی ایجاد رواناب و فرسایش خاک می‌باشد، چرا که میزان نفوذ نشان می‌دهد که چه مقدار از آب وارد منطقه غیراشباع خاک شده و چه مقدار از آن به رواناب تبدیل و موجب فرسایش می‌گردد (Hillel, 1998). تعیین حجم رواناب حاصل از بارندگی به منظور پیش‌بینی و پیشگیری از وقوع سیلاب، فرسایش خاک و انتقال آلاینده‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است که به‌طور مستقیم به پدیده نفوذ آب در خاک وابسته است (Lange *et al.*, 1999). نفوذ آب در خاک، شامل فرآیند اولیه ورود آب از سطح خاک به داخل ناحیه غیر اشباع خاک می‌باشد. این فرآیند یکی از اجزای اصلی هیدرولوژی سطحی و زیرسطحی است (Turner, 2006; Kumar, 2006). روابط نفوذ شامل دو دسته کلی روابط تجربی و روابط تئوری مبتنی بر فیزیک می‌باشند. از

جمله روابط تئوری مبتنی بر فیزیک می‌توان به رابطه فیلپ و رابطه گرین‌امپت و از روابط تجربی نیز به روابط کوستیاکف و هورتن اشاره نمود (Mohammadi & Refahi, 2005). انجام تمامی طرح‌های آب و خاک نیازمند داشتن آگاهی از مشخصات نفوذپذیری خاک به خصوص نفوذ پایه یا نهایی می‌باشد (Machiwal *et al.*, 2006). بنابراین ارائه یک روش مطمئن، سریع، نسبتاً ساده و کم‌هزینه جهت برآورد پارامتر نفوذ نهایی می‌تواند قابل توجه واقع شود.

امروزه با به‌کارگیری روش‌های هوشمند از جمله مدل‌های آماری، شبکه‌های عصبی مصنوعی و سیستم‌های مختلف فازی می‌توان میزان نفوذپذیری آب در خاک را با دقت و اطمینان بیشتری برآورد نمود. تاکنون تحقیقاتی در زمینه تخمین نفوذپذیری خاک با استفاده شبکه‌های عصبی مصنوعی و همچنین برخی سیستم‌های فازی انجام گرفته است اما به نظر می‌رسد استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی فازی و همچنین مدل شبکه‌های عصبی-فازی (نرو-فازی) در تخمین میزان نفوذپذیری خاک تاکنون کمتر مورد توجه و بررسی قرار گرفته است. بسیاری از خواص خاک که خصوصیات هیدرولیکی آن را تحت تأثیر قرار می‌دهند توسط محققین متعددی به منظور تخمین غیرمستقیم فرآیند نفوذ مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Canarache *et al.*, 1968; Rawls *et al.*, 1989; van De Genachte *et al.*, 1996; Mbagwu, 1997; Ghorbani Dashtaki, 2008). همچنین تحقیقات بسیاری در زمینه پیش‌بینی پارامترهای نفوذ با استفاده از داده‌های موجود خاک انجام شده است (Genachte *et al.*, 1996; Ghorbani Dashtaki, 2008). هیچ‌کدام از آن‌ها به نتیجه رضایت‌بخشی در زمینه پیش‌بینی پارامتری نفوذ دست نیافتند و همگی پیش‌بینی نقطه‌ای را توصیه نمودند.

شبکه عصبی مصنوعی از جمله روش‌های غیرمستقیم تخمین خصوصیات هیدرولیکی خاک است که در سال‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته است (Schaap *et al.*, 2001; Baker & Ellison, 2008; Haghverdi *et al.*, 2012). پرچمی و همکاران (Parchami *et al.*, 2013) شبکه عصبی مصنوعی را به منظور تخمین نقطه‌ای فرآیند نفوذ مورد استفاده قرار دادند و اعلام نمودند که این روش در صورت وجود اطلاعات کمی ساختمان خاک روش دقیق و مناسبی جهت تخمین نقطه‌ای نفوذ می‌باشد. ابوکریما و همکاران

و تاثیر هریک از متغیرهای فوق در توالی‌های زمانی گذشته بر روی میزان دبی جریان رودخانه در ماه‌های آینده را بررسی نمودند و میزان دبی رودخانه در ماه‌های آینده پیش‌بینی گردید که نتایج خوبی در این زمینه به دست آمد. محققان فوق مدل شبکه عصبی مصنوعی را برای پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی توصیه نموده و مناسب تشخیص دادند. همچنین شو و اوآردا (Shu & Ouarda, 2008) به بررسی و مقایسه توانایی روش نروفازی و چندین سیستم دیگر جهت پیش‌بینی دبی جریان از جمله سیستم فازی پرداختند که در پایان اعلام گردید که روش نروفازی توانایی بسیار بهتری در پیش‌بینی دبی جریان در مقایسه با دیگر روش‌های پیش‌بینی دارد. در برخی پژوهش‌ها به پهنه‌بندی حوزه‌های آبخیز بر اساس خصوصیات مختلف خاک با استفاده از خوشه‌بندی فازی پرداخته شده است (Noorzadeh *et al.*, 2006; Rao & Srinivas, 2011) در تحقیقی دیگر ورنیو و همکاران (Vernieuwe *et al.*, 2007) به بررسی تخمین جریان آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های فازی خوشه‌ای با در نظر گرفتن میزان رطوبت خاک به عنوان پارامتر ورودی پرداختند و در پایان به عملکرد مناسب این روش در پیش‌بینی جریان آب زیرزمینی اشاره نمودند.

با توجه به پژوهش‌های انجام شده به نظر می‌رسد که تاکنون استفاده از روش‌های فازی (فازی، نرو-فازی و خوشه‌بندی فازی) در تخمین فرآیند نفوذ با استفاده از داده‌های فیزیکی و شیمیایی خاک کمتر مورد توجه قرار گرفته است و لذا پژوهشی به طور مستقیم به این موضوع نپرداخته است. لذا در پژوهش حاضر به بررسی و مقایسه عملکرد سه روش فازی فوق‌الذکر در تخمین سرعت نفوذ نهایی خاک با استفاده از داده‌های موجود شامل درصد رطوبت وزنی پیشین خاک، درصد مواد آلی خاک و درصد آهک خاک در دشت ساحلی بهشهر-گلوگاه به دلیل نزدیک بودن منطقه به ساحل دریا و همچنین بالا بودن سطح آب دریا و در نتیجه اهمیت بالای بررسی تاثیرپذیری نفوذ سطحی خاک از جبهه آب شور در این منطقه پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دشت ساحلی بهشهر گلوگاه در طول جغرافیایی $29^{\circ}04'$ $45^{\circ}05' - 53^{\circ}22'$ و عرض جغرافیایی $27^{\circ}64'$

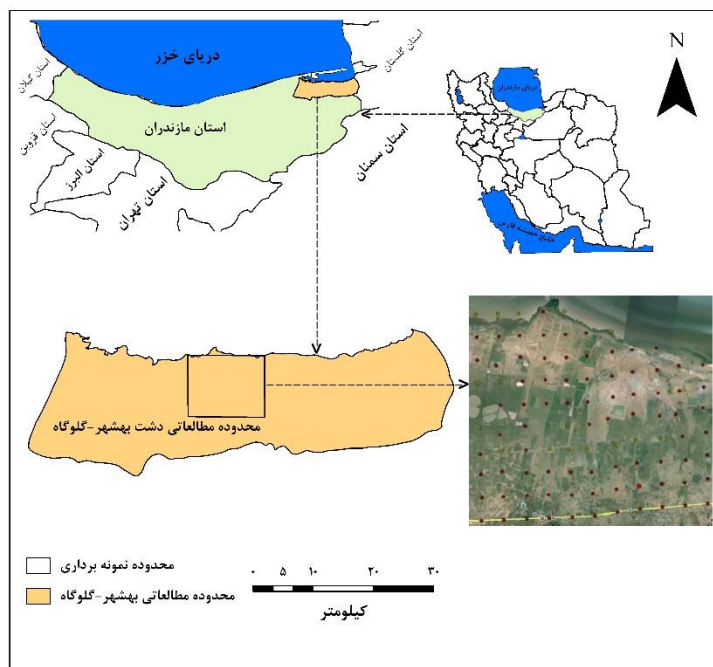
(Aboukarima *et al.*, 2007) سیستم فازی تاکاگی سوگنوا^۱ را برای پیش‌بینی نفوذپذیری خاک با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای به دست آمده از روش استوانه مضاعف^۲ مورد آزمایش قرار دادند که نتایج نشان از شبیه‌سازی تقریباً دقیق این مدل بود. ابراهیمی و نایب لوثی (Ebrahimi & Nayeblouei, 2009) نفوذپذیری نهایی خاک را با استفاده از مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی، برآورد نمودند. ورودی‌ها در این مدل شامل پارامترهای فیزیکی خاک از جمله وزن مخصوص حقیقی و ظاهری، درصد مواد آلی، تخلخل و همچنین پارامترهای شیمیایی آن شامل میزان سدیم و اسیدیته و پارامتر خروجی درمدل مذکور شامل مقادیر نفوذپذیری نهایی خاک لحاظ شد. نتایج این تحقیق نشان داد که بر اساس پارامترهای زودیافت خاک مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی با دقت بسیار خوبی قادر به تخمین و پیش‌بینی مقادیر نفوذپذیری نهایی خاک‌ها می‌باشند. کاشی و همکاران (Kashi *et al.*, 2011) با استفاده از مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی، نفوذپذیری خاک را پیش‌بینی نموده و نتایج آن را با یک مدل آماری مورد مقایسه قرار داد. نتایج نشان‌دهنده کارایی بهتر مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی نسبت به مدل آماری بود. قربانی دشتکی و همکاران (Ghorbani Dashtaki *et al.*, 2009) با استفاده از پارامترهای زودیافت خاک به پیش‌بینی نفوذپذیری خاک با روش شبکه عصبی مصنوعی پرداخته و نتایج به دست آمده را با چند مدل دیگر برآورد نفوذ مقایسه نمودند که عملکرد شبکه عصبی مصنوعی در مقایسه با دیگر روش‌ها مناسب تر تشخیص داده شد. در زمینه استفاده از روش‌های فازی به منظور تخمین دیگر خصوصیات هیدرولیکی خاک نیز می‌توان به پژوهش‌هایی از جمله هونگ و همکاران (Hong *et al.*, 2002) در مورد رفتار دینامیک آب‌های زیرزمینی در نیوزیلند، راتو و سرینیواس (Rao & Srinivas, 2005) در زمینه منطقه‌ای نمودن فراوانی وقوع سیل در حوزه‌های آبخیز ایالت ایندیانا ایالات متحده و ... اشاره نمود که در اکثر این تحقیقات نتایج به دست آمده رضایت‌بخش بوده است. پوستی‌زاده و همکاران (Poostizadeh *et al.*, 2008) نیز با استفاده از سیستم استنتاج فازی و بر اساس دبی، درجه حرارت و بارش ماهانه، سری پیوسته‌ای از دبی جریان رودخانه و هر یک از متغیرهای مذکور تشکیل داده

1- Takagi-Sugeno

2-Double Ring

کوهستانی البرز و فاصله اندک کوه و دریا از طرف دیگر، دمای معتدلی دارد که دامنه گرمای آن محدود است. تابستان‌های گرم و مرطوب و زمستان‌های معتدل و مرطوب از ویژگی‌های عمده این منطقه می‌باشد.

۳۶° ۴۳' ۳۶/۷۴" - ۳۶° ۴۲' واقع شده است (شکل ۱). وسعت این منطقه ۸۰۰۰ هکتار می‌باشد. حداقل ارتفاع منطقه ۳۰- متر و حداکثر آن ۲۸ متر می‌باشد. عرصه تحقیق به علت نزدیکی به دریای خزر از یک طرف و دیواره



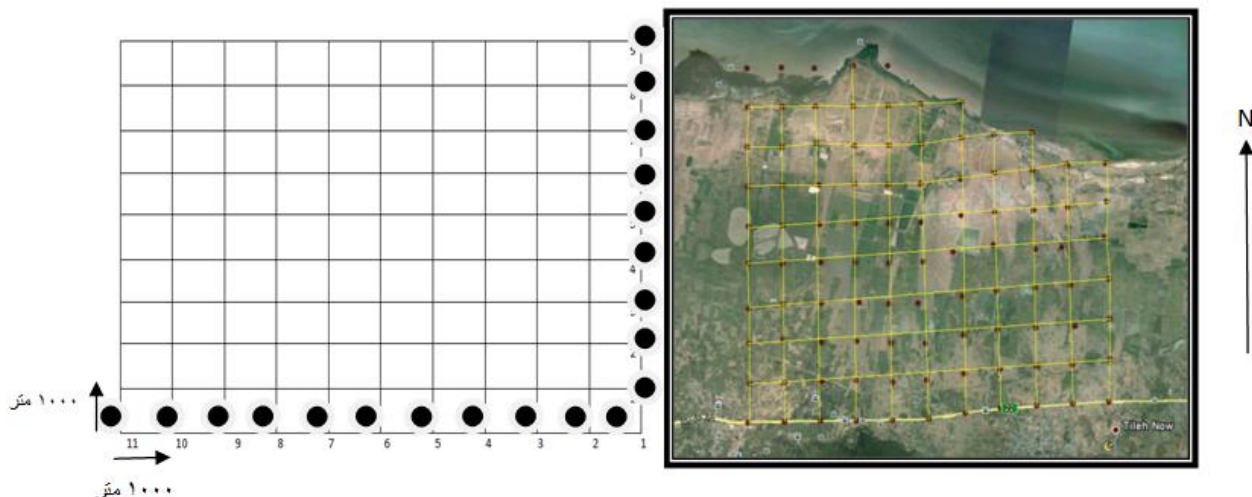
شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و شکل شماتیک از طرح نمونه‌برداری
Figure 1- Location of the study area and a schematic view of the sampling plan

و تهیه شبکه برداشت، دقت کافی به عمل آید. با وجود این تفاسیر به تهیه شبکه‌ای به ابعاد ۱۰۰۰ متر × ۱۰۰۰ متر پرداخته و سپس طی عملیات صحرائی با استفاده از دستگاه GPS موقعیت هر یک از گره‌های شبکه در منطقه مورد مطالعه پیدا شده و در محل هر یک از گره‌ها اقدام به آزمایش نفوذسنجی گردید. با توجه به ابعاد شبکه و مساحت منطقه در نهایت در تعداد ۷۳ نقطه آزمایش نفوذسنجی انجام گرفت (شکل ۲).

اغلب کاربری اراضی این منطقه را زمین‌های کشاورزی در بر می‌گیرند که در طول سال تحت کشت گندم، لوبیا، باقلا و کلزا قرار می‌گیرند. در اراضی ساحلی گیاهانی شورپسند از خانواده سالیکورنیا و گیاهانی دیگر از جمله قمیش و جگن به وفور در این مناطق یافت می‌شود.

آزمایش‌های نفوذسنجی

به منظور انجام پژوهش، ابتدا با استفاده از نرم افزار Google Earth بررسی اجمالی در منطقه مورد مطالعه صورت پذیرفت تا در شناسایی هر چه بهتر نقاط قابل اندازه‌گیری



شکل ۲- شکل شماتیک از طرح نمونه برداری

Figure 2- Schematic view of the sampling plan



شکل ۳- روش تک استوانه برای اندازه‌گیری نفوذپذیری آب در خاک

Figure 3- Single Ring approach for soil infiltration measurement

مدل‌سازی عددی

در کلیه روش‌های مورد مطالعه، درصد رطوبت وزنی پیشین خاک، درصد مواد آلی خاک و درصد آهک خاک به عنوان پارامترهای ورودی و سرعت نفوذ نهایی خاک به عنوان پارامتر خروجی مدل در نظر گرفته شدند چرا که این سه فاکتور، تاثیر بسیار قابل توجهی در ساختمان خاک و میزان نفوذپذیری آن دارند (Ebrahimi & Nayeblouei, 2009; Kashi *et al.*, 2011).

الگوریتم خوشه‌بندی فازی

هدف این روش، افراز یک مجموعه معلوم از داده‌ها به تعداد معینی خوشه می‌باشد، به طوری که این افراز دو ویژگی مهم داشته باشد: اولاً خوشه‌های آن همگن باشند، یعنی داده‌هایی که به یک خوشه مشخص تعلق دارند باید تا حد ممکن

اندازه‌گیری نرخ نفوذ آب در خاک با استفاده از استوانه تک‌حلقه (شکل ۳) به قطر ۳۰ سانتیمتر صورت پذیرفت (Dashtaki *et al.*, 2010; Reynolds *et al.*, 2002). در این روش، فرض بر آن است که نفوذ آب به خاک از درون استوانه به صورت سه بعدی است و بر این اساس، جریان آب درون استوانه بر مبنای معادله ریچاردز حل شده و با حل آن بر اساس شرایط مرزی و اولیه اعمال شده، جریان یک بعدی شبیه‌سازی شده و سپس هدایت آبی اشباع عمودی خاک تعیین می‌گردد (Reynolds *et al.*, 2002). اگرچه استفاده از روش استوانه مضاعف در آزمایش‌های نفوذسنجی توصیه شده است (Parchami *et al.*, 2013)، اما در یک منطقه وسیع با زمان، امکانات و نیروی انسانی معین، روش تک‌استوانه امتیازات قابل توجهی نسبت به روش استوانه مضاعف دارد و به آن ترجیح داده می‌شود (Nimmo *et al.*, 2009). چرا که تجارب اخیر نشان داده است که تغییرات منطقه‌ای نفوذپذیری، عموماً به اندازه‌ای زیاد است که خطای ناشی از عدم وجود استوانه بیرونی در مقابل آن اندک است. از این رو در برخی از مراجع، استفاده تنها از یک استوانه کافی تشخیص داده شده است (Bouwer, 1986; Reynolds *et al.*, 2002). آزمایش نفوذسنجی در ۷۳ نقطه در محدوده‌ای به وسعت ۸۰۰۰ هکتار بر اساس استاندارد USDA-NRCS (۲۰۰۵) انجام پذیرفت.

برای بررسی توانایی سه روش خوشه‌بندی فازی، نروفازی و فازی در تخمین میزان نفوذپذیری خاک، خروجی‌های متناظر با هر یک از مجموعه داده‌های آموزش (۸۰ درصد) و آزمون (۲۰ درصد) تعیین شدند. نتایج حاصل از کاربرد روش‌های مختلف با استفاده از شاخص‌های آماری با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفتند.

معیارهای ارزیابی

جهت ارزیابی کارایی مدل‌های تخمین میزان نفوذپذیری خاک، از شاخص‌های آماری مختلف شامل ریشه میانگین مربعات خطا یا RMSE (رابطه ۲)، میانگین اختلاف یا BIAS (رابطه ۳)، میانگین انحراف یا MD (رابطه ۴) و ضریب همبستگی یا r (رابطه ۵) استفاده گردید (Dashtaki *et al.*, 2010; Amini *et al.*, 2005).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (I_{Si}^o - I_{Si}^s)^2} \quad (2)$$

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_i \frac{I_{Si}^o - I_{Si}^s}{I_{Si}^o} \quad (3)$$

$$MD = \frac{1}{n} \sum_i I_{Si}^o - I_{Si}^s \quad (4)$$

$$r = \frac{\sum_{i=0}^n (I_{Si}^o - \bar{I}_{Si}^o)(I_{Si}^s - \bar{I}_{Si}^s)}{\sqrt{\sum_{i=0}^n (I_{Si}^o - \bar{I}_{Si}^o)^2 - \sum_{i=0}^n (I_{Si}^s - \bar{I}_{Si}^s)^2}} \quad (5)$$

در این روابط I_{Si}^o : نفوذپذیری نهایی مشاهده شده، I_{Si}^s : نفوذپذیری نهایی برآورد شده، \bar{I}_{Si}^o : میانگین مقادیر برآورد شده، \bar{I}_{Si}^s : میانگین مقادیر مشاهده‌ای و n : تعداد داده است.

نتایج و بحث

در جدول ۱ مقادیر آماری نفوذ نهایی اندازه‌گیری شده (مشاهده‌ای) خاک ارائه شده است و جدول ۲ نشان‌دهنده معیارهای محاسبه شده ارزیابی خطا برای سه مدل مورد مطالعه یعنی الگوریتم خوشه‌بندی فازی، سیستم استنتاج فازی -عصبی تطبیقی (ANFIS) یا نرو-فازی و سیستم استنتاج فازی (FIS) در برآورد سرعت نفوذ نهایی خاک می‌باشد.

مشابه باشند. ثانیاً خوشه‌های مختلف نسبت به یکدیگر نامتجانس باشند. در الگوریتم خوشه‌بندی c ، میانگین فازی تابع هدف به صورت رابطه (۱) می‌باشد (Bezdek, 1981) رابطه:

$$J = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n U_{ik}^{m'} d_{ik}^2 = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n U_{ik}^{m'} \|x_k - v_i\|^2 \quad (1)$$

در رابطه (۱) m' یک عدد حقیقی بزرگتر از ۱ است که در اکثر موارد برای آن عدد ۲ انتخاب می‌شود (Hathaway & Bezdek, 2001). x_k نمونه k ام و v_i نماینده یا مرکز خوشه i ام و n تعداد نمونه‌ها می‌باشد. U_{ik} میزان تعلق نمونه i ام در خوشه k را نشان می‌دهد. علامت $\|*\|$ میزان تشابه (فاصله) نمونه با مرکز خوشه می‌باشد که می‌توان از هر تابعی که بیانگر تشابه نمونه و مرکز خوشه باشد استفاده کرد (Bezdek, 1981).

سیستم استنتاج فازی -عصبی انطباقی (ANFIS)

پروفسور جانگ در سال ۱۹۹۳ مدل استنتاج فازی-عصبی ANFIS را ارائه کرد که همانند مدل فازی از دانش تجربی بهره گرفته و نیز همانند مدل شبکه عصبی مصنوعی می‌تواند آموزش ببیند (Jange, 1993). در این تحقیق نیز داده‌های نفوذپذیری پس از نرمال‌سازی و انتخاب تابع عضویت $gussi$ وارد ANFIS در نرم افزار مطلب شده و با انتخاب تابع عضویت خطی، خروجی‌ها دریافت شدند.

سیستم استنتاج فازی (FIS)

سیستم استنتاج فازی، سیستمی بر اساس ترکیب قوانین اگر- آنگاه می‌باشد. در این سیستم چند قانون فازی بیانگر حالات مختلف سیستم می‌باشند. به ازای هر ورودی خاص به سیستم، مقادیر مناسب خروجی آن با استفاده از میزان ارضای هر قانون توسط آن ورودی‌ها و ترکیب خروجی‌های مختلف محاسبه می‌گردد. جواب نهایی بر اساس سهم فعال شدن هر قانون و ترکیب جواب‌های آنها با هم به دست می‌آید. ترکیب نتایج قوانین مختلف با استفاده از روش‌های مختلفی انجام می‌گیرد. روش استفاده شده در این تحقیق موسوم به روش ممدانی می‌باشد (Mamdani, 1976).

جدول ۱- مقادیر آماری نفوذ نهایی اندازه‌گیری شده (مشاهده‌ای) خاک (سانتی‌متر در دقیقه)
Table 1- Statistical values of measured (observed) soil infiltration (cm min⁻¹)

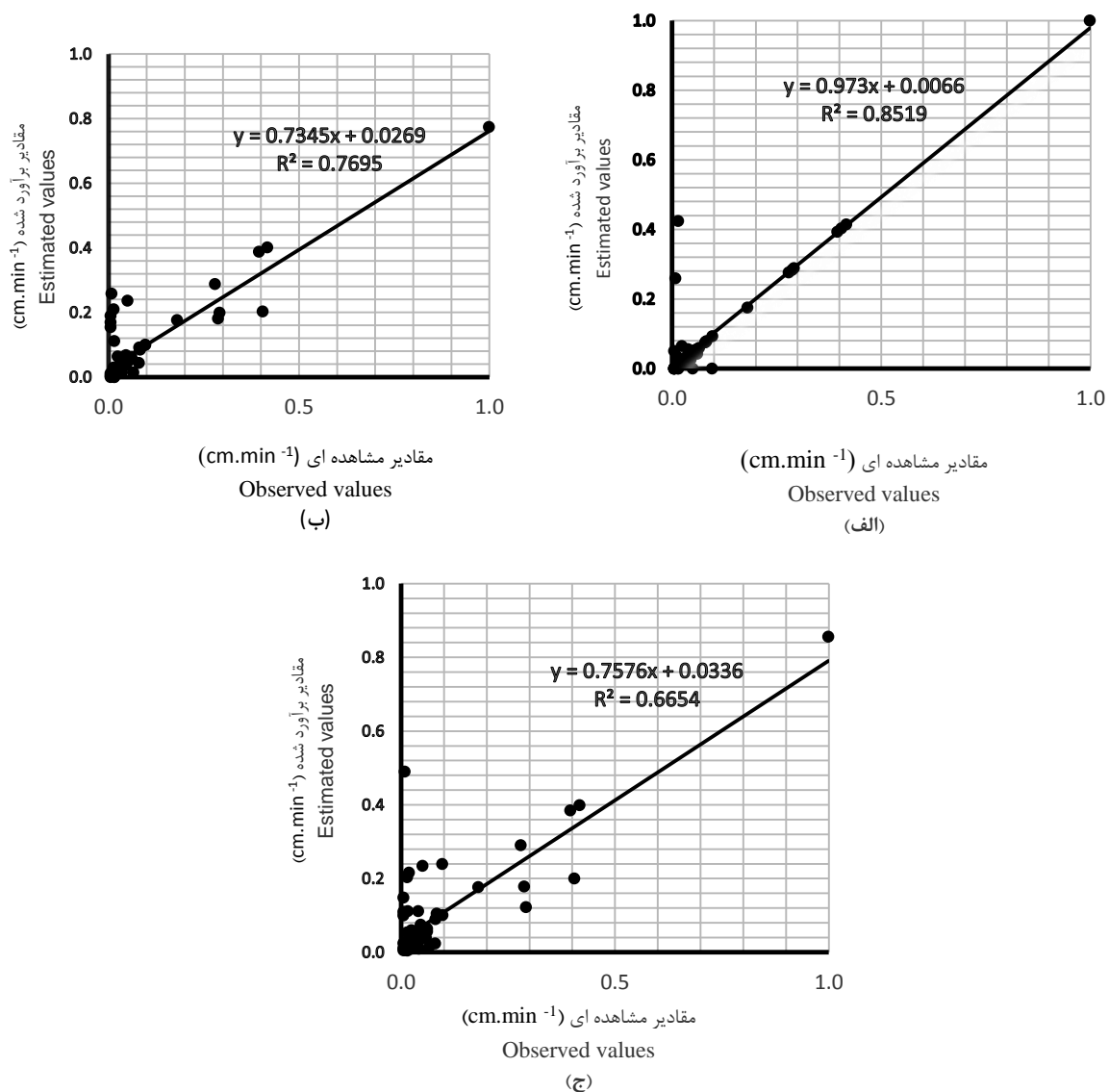
| بیشینه (Maximum) | کمینه (Minimum) | میانگین (Mean) | انحراف معیار (Standard Deviation) |
|------------------|-----------------|----------------|-----------------------------------|
| 0.999 | 0.005 | 0.070 | 0.144 |

جدول ۲- مقادیر شاخص‌های آماری و رتبه ارزیابی خطا در روش‌های مختلف برآورد نفوذ نهایی خاک در مجموعه داده‌های آزمون
Table 2- Values of statistical indices and error evaluation rank in various estimation methods of soil infiltration in the test data set

| روش‌های برآورد نفوذ نهایی خاک (Estimation methods of soil infiltration) | | | |
|---|------------------|-------------------------------|--------------------------|
| شاخص‌های آماری (Statistical indices) | نرو-فازی (ANFIS) | الگوریتم خوشه‌بندی فازی (FCA) | سیستم استنتاج فازی (FIS) |
| MD (cm.min ⁻¹) | 0.0042 | 0.0075 | 0.0161 |
| BIAS (cm.min ⁻¹) | 0.6754 | 2.1165 | 2.5042 |
| RMSE (cm.min ⁻¹) | 1.2096 | 2.0244 | 2.4533 |
| r | 0.9223 | 0.8776 | 0.8167 |
| میانگین رتبه‌ها (Mean rank) | 1 | 2 | 3 |

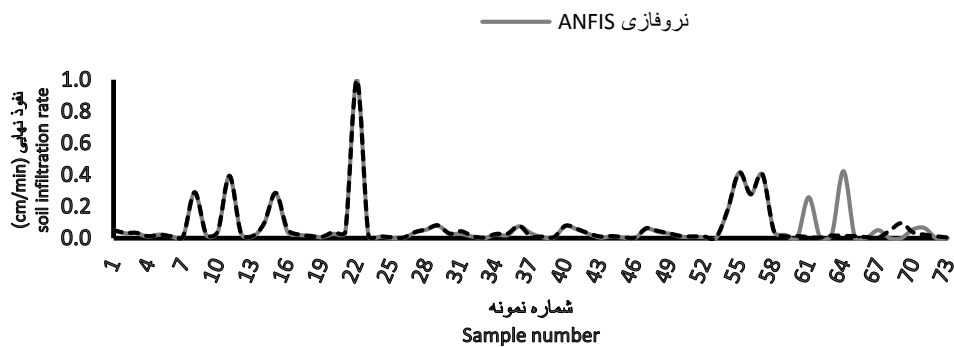
همان‌طور که جدول (۲) نشان می‌دهد، روش نرو-فازی بهترین عملکرد را در تخمین سرعت نفوذ نهایی خاک در بین مدل‌های مورد مطالعه نشان داد، در حالی که الگوریتم خوشه‌بندی فازی و سیستم استنتاج فازی به ترتیب در رتبه‌های بعد قرار دارند. محاسبه میانگین رتبه‌ها در شاخص‌های آماری مورد نظر نیز نشان داد، روش نرو-فازی با میانگین رتبه ۱، الگوریتم خوشه‌بندی فازی با میانگین رتبه ۲ و سیستم استنتاج فازی با میانگین رتبه ۳ به ترتیب با دقت و اطمینان بیشتری سرعت نفوذ نهایی خاک را برآورد می‌نمایند. در شکل ۴ مقادیر مشاهده‌ای سرعت نفوذ نهایی خاک در مقابل مقادیر برآورد شده توسط مدل‌های مورد مطالعه رسم شده است. بر اساس این نمودار، بیشترین همبستگی میان مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده در مدل نرو-فازی ($R^2=0/8526$) وجود دارد و پس از آن، مدل‌های

الگوریتم خوشه‌بندی فازی ($R^2=0/7703$) و سیستم استنتاج فازی ($R^2=0/6671$) قرار دارند. بررسی اشکال ۵، ۶ و ۷ نشان می‌دهد که بهترین انطباق مقادیر برآورد شده با مقادیر مشاهده‌ای سرعت نفوذ نهایی خاک متعلق به روش نرو-فازی است و در مورد دو مدل دیگر، الگوریتم خوشه‌بندی فازی با اختلاف کمی نسبت به سیستم استنتاج فازی، انطباق بهتری را داراست. نکته قابل توجه اینکه در هر سه روش مورد بررسی از نقطه شماره ۶۱ تا ۷۳ انطباق قابل قبولی بین داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده مشاهده نمی‌گردد که دلیل این موضوع می‌تواند متراکم بودن خاک در نقاط مذکور و دشوار بودن نصب استوانه تک‌حلقه و در نتیجه کاهش دقت آزمایش در نفوذسنجی خاک تلقی گردد.



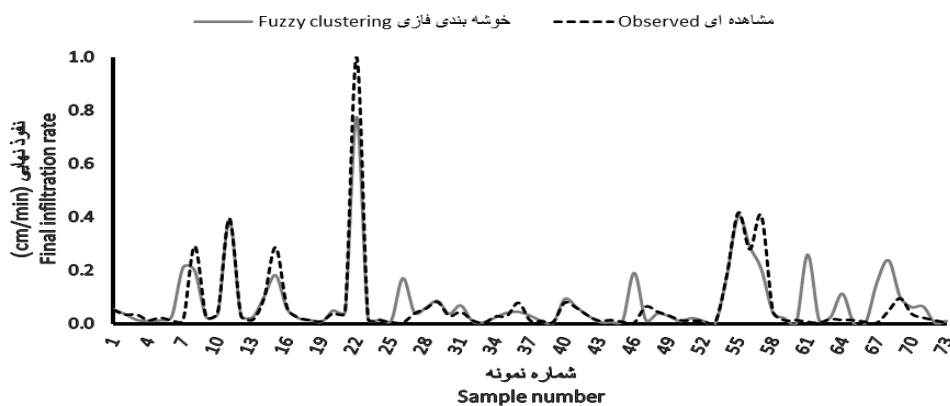
شکل ۴- ترسیم مقادیر مشاهداتی در مقابل مقادیر برآورد شده نفوذ نهایی خاک توسط الف) مدل نرو-فازی (ANFIS) ب) الگوریتم خوشه‌بندی فازی (FCA) ج) سیستم استنتاج فازی (FIS)

Figure 4- Graph of observed values versus estimated values of soil infiltration by: a) ANFIS b) (FCA) c) FIS

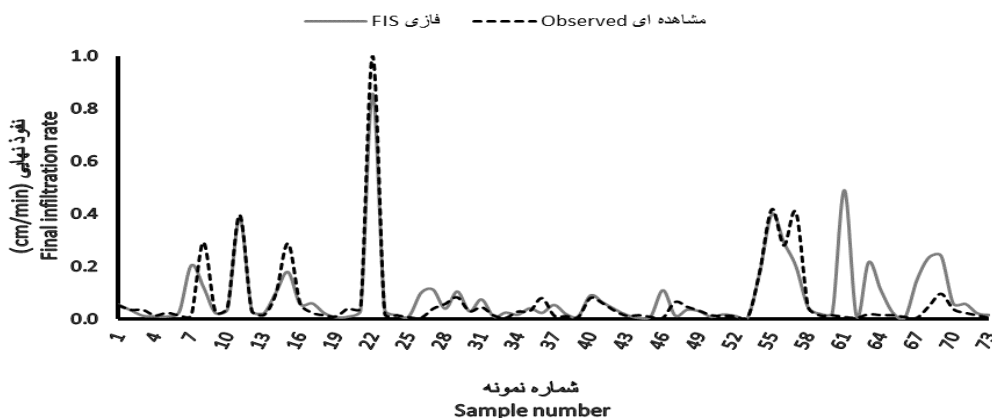


شکل ۵- انطباق مقادیر مشاهده‌ای نفوذ نهایی خاک و مقادیر برآوردی آن توسط روش نرو فازی

Figure 5- Adaptation of observed values of soil infiltration rate and estimated values by ANFIS



شکل ۶- انطباق مقادیر مشاهده‌ای نفوذ نهایی خاک و مقادیر برآوردی آن توسط روش الگوریتم خوشه‌بندی فازی
Figure 6- Adaptation of observed values of soil infiltration rate and estimated values by FCA



شکل ۷- انطباق مقادیر مشاهده‌ای نفوذ نهایی خاک و مقادیر برآوردی آن توسط سیستم استنتاج فازی
Figure 7- Adaptation of observed values of soil infiltration rate and estimated values by FIS

(Aboukarima, 2007) در تضاد است. این عدم همخوانی احتمالاً به دلیل عدم دقت در توابع عضویت در نظر گرفته شده برای متغیرهای ورودی و خروجی می‌باشد در این صورت، این مدل نیاز به بهینه‌سازی دارد. البته بایستی در نظر داشت که مدل‌های فازی و نرو-فازی مدل جعبه سیاه هستند اما مدل فازی در مقابل مدل نرو-فازی که قدرت یادگیری دارد، از توانایی کمتری در برآورد سرعت نفوذ نهایی خاک که تابعی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک است (Canarache *et al.*, 1968; Rawls *et al.*, 1989; van De Genachte *et al.*, 1996; Mbagwu, 1997; Ghorbani Dashtaki, 2008)، برخوردار می‌باشد. مزیت الگوریتم خوشه‌بندی فازی، خوشه‌بندی مقادیر مشابه پارامترهای ورودی است که این موضوع به تشخیص تغییر مکانیسم فرآیندهای مورد مطالعه کمک شایانی می‌نماید، البته این موضوع، اثر خود را در فرآیندهایی که عامل زمان

بر اساس نتایج به‌دست آمده، مدل نرو-فازی که هم از محاسن مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی و هم مدل فازی سود می‌برد، بهترین نتایج را در تخمین سرعت نفوذ نهایی آب در خاک ارائه نمود. از آنجا که انواع مدل‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی توانایی انعکاس و در نظر گرفتن رفتار تصادفی متغیرهای هیدرولوژیکی را ندارند، بیشتر در پیش‌بینی‌های نقطه‌ای به‌کار می‌روند (Poostizadeh *et al.*, 2008) و در پژوهش حاضر نیز برآورد سرعت نفوذ نهایی خاک یک تخمین نقطه‌ای محسوب می‌شود، لذا دلیل عملکرد بهتر مدل نرو-فازی همین موضوع می‌باشد چرا که یکی از عوامل مؤثر در افزایش کارایی مدل‌ها انتخاب مدل بر اساس نوع داده‌های موجود می‌باشد (Singh *et al.*, 2002). همچنین مدل فازی نتوانست به‌خوبی بیانگر سرعت نفوذ نهایی خاک باشد که این نتیجه با نتایج به‌دست آمده توسط ابوکریما و همکاران

با توجه به ضرورت و اهمیت بالای پارامتر نفوذپذیری خاک‌ها در طرح‌های آب و خاک و همچنین با عنایت به هزینه‌های بالای آزمایش‌های یاد شده، با انجام تحقیقات مشابه می‌توان ضمن تعیین مدل‌های مناسب تخمین نفوذپذیری خاک در مناطق مختلف با استفاده از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، گامی در زمینه صرفه‌جویی در زمان و هزینه در انجام طرح‌های آب و خاک برداشت.

نتیجه‌گیری کلی

با توجه به نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، استفاده از مدل نروفازی که یک مدل با قدرت یادگیری است، برای تخمین سرعت نفوذ نهایی خاک با استفاده از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن توصیه می‌شود. همان‌طور که خوشه‌بندی داده‌های ورودی موجب برتری الگوریتم خوشه‌بندی فازی نسبت به سیستم استنتاج فازی شد، به‌نظر می‌رسد خوشه‌بندی پارامترهای ورودی در مدل نروفازی نیز می‌تواند در افزایش دقت تخمین موثر باشد که البته این موضوع نیازمند تحقیقات بیشتر است.

در آن‌ها دخیل است، بیشتر نمایان می‌سازد و به همین دلیل این مدل نتوانست توانایی بالایی از خود در برآورد سرعت نفوذ نهایی خاک نشان دهد چون همان‌طور که اشاره شد، سرعت نفوذ نهایی خاک بیشتر تحت تاثیر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک است تا زمان. اما به‌نظر می‌رسد همین خوشه‌بندی مقادیر مشابه پارامترهای ورودی در الگوریتم خوشه‌بندی فازی موجب عملکرد بهتر این الگوریتم در مقایسه با سیستم استنتاج فازی در تخمین سریع نفوذ نهایی خاک شده است. از آن‌جا که افزایش عوامل پیش‌بینی‌کننده و ورودی‌های مدل‌ها سبب کاهش وابستگی خروجی مدل‌ها به یک یا چند عامل خاص و عدم نادیده گرفتن عواملی که اثر قابل توجهی بر میزان نفوذپذیری خاک دارند، می‌گردد. لذا لازم است داده‌های بیشتری از مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها و مقادیر نفوذپذیری محدوده مطالعات تهیه گردد تا زمینه برآورد و مقایسه دقیق‌تر مدل‌های مورد مطالعه فراهم آید. همچنین انجام تحقیقات مشابه در سایر مناطق امکان مقایسه نتایج و بحث از دیدگاه‌های مختلف علمی را فراهم خواهد نمود. بنابراین

References

- Aboukarima A.W.M., El Marazky M.S.A., and Guirguis A.E. 2007. Fuzzy system for determining water infiltration affected by field practices. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, 24 (4): 903-922.
- Ahmadi H., Tahmooreth M., and Mohamad Asgari H. 2008. The use of Fuzzy Inference System in suspended sediment estimation (A case study: Taleqan Watershed). *Iranian Journal of Watershed Sciences and Engineering*, 2(5): 53-62. (In Persian)
- Ahmadi H., Tahmoureth M., and Asgari H.M. 2008. The use of Fuzzy Inference System in estimation of suspended load (A case study: Taleqan Watershed). *Iran-Watershed Management Science and Engineering*, 2(5): 53-62. (In Persian)
- Amini M., Afyuni M., Fathianpour N., Khademi H., and Fluchler H. 2005. Continuous soil pollution mapping using fuzzy logic and spatial interpolation. *Geoderma*, 124: 223-233.
- Baker L., and Ellison D., 2008. Optimisation of pedotransfer functions using an artificial neural network ensemble method. *Geoderma*, 144: 212-224.
- Baybordi M. 1983. Principles of Irrigation Engineering. Soil-Water Relationship, Tehran University Press, 633p. (In Persian)
- Bezdek JC. 1981. Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms. Plenum Press, New York.
- Bouwer H. 1986. Intake Rate: Cylinder Infiltrometer. In: Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods, Klute, A. (Eds.). Soil Science Society of America, Wisconsin, ISBN-10: 0891188118, pp. 825-844.
- Canarache A., Motoc E., and Dumitriu R. 1968. Infiltration rate as related to hydraulic conductivity, moisture deficit and other soil properties. In: Rijtema P.E., Wassink H. (Eds.), Water in the Unsaturated Zone. Proceedings of the Wageningen Symposium, Vol. 1, pp. 392-401.
- Chahinian N., Voltz M., Moussa R., and Trotoux G. 2006. Assessing the impact of hydraulic properties of a crusted soil on overland flow modelling at the field scale. *Hydrological Processes* 20(8): 1701-1722.

- Dashtaki S.G., Homae M. and Khodaverdiloo H. 2010. Derivation and validation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve using a variety of soil data. *Soil Use and Management*, 26(1): 68-74.
- Ebrahimi K., and Nayeblouei F. 2009. Estimating final soil permeability using artificial neural network (A case study: Pards Aboureyhan field). *Journal of Soil and Water Conservation Researches*, 16 (1): 37-57. (In Persian)
- Ghorbani Dashtaki Sh., Homae M., and Mahdian MH. 2010. Effect of land use change on spatial variability of infiltration parameters. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 2(4): 206-221. (In Persian)
- Ghorbani Dashtaki Sh., 2008. Estimating Soil Water Infiltration Parameters Using Pedotransfer Functions, Artificial Neural Networks and Geostatistics. Tarbiat Modares University, Iran, PhD Dissertation. (In Persian)
- Ghorbani Dashtaki Sh., Homae M., Mahdian M.H., and Kouchakzadeh, M. 2009. Site-Dependence Performance of Infiltration Models. *Water Resources Management*, 23(13): 2777-2790.
- Haghverdi A., Cornelis W.M., and Ghahraman B. 2012. A pseudo-continuous neural network approach for developing water retention pedotransfer functions with limited data. *Journal of Hydrology*, 442-443: 46-54.
- Hathaway R.J., and Bezdek J.C. 2001. Fuzzy c-means clustering of incomplete data. *IEEE Transaction Systems, Man and Cybernetics*, 31: 735- 744.
- Hillel D. 1998. Environmental Soil Physics. Academic Press, San Diego, CA.
- Hong Y.S., Rosen M.R., and Reeves R.R. 2002. Dynamic fuzzy modelling of storm water infiltration in urban fractured aquifers. *Journal of Hydrologic Engineering*, 7: 380-391.
- Jang J.S.R. 1993. ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference systems. *IEEE Transaction Systems, Man and Cybernetics*, 23:665-685.
- Kashi H., Emamgholizadeh S., Ghorbani H., and Hashemi, S.A.A. 2011. Estimation of basic infiltration rate using physical and chemical characteristics of the soil by Artificial Neural Network. 11th National Conference of Irrigation and Evaporation Reduction.
- Kashi H., Emamgholizadeh S., Qorbani H., and Hashemi S.A.A. 2011. Estimation of final soil permeability using soil physical and chemical characteristic by ANN. 11th Conference of Irrigation and Evaporation Reduction, Iran.
- Kashi H., Emamqolizadeh S., Qorbani H., and Hashemi S.A.A. 2013. Estimation of soil infiltration using artificial neural network and linear regression in agricultural lands. *Journal of Environmental Erosion Research*, 3(9): 19-34. (In Persian)
- Kumar C.P. 2006. Groundwater Flow and Contaminant Transport Models: An Overview. *Journal of Applied Hydrology*, Association of Hydrologists of India, 2: 94-110.
- Lange J.C., Leibundgut N., Greenbaum and Schick A.P. 1999. A noncalibrated rainfall-runoff model for large, arid catchments, *Water Resources*, 35(7): 2161-2172.
- Lassabatere, L., Angulo-Jaramillo R., Goutaland D., Letellier L., Gaudet J.P., Winiarski T., and Delolme C., 2010. Effect of the settlement of sediments on water infiltration in two urban infiltration basins. *Geoderma*, 156: 316-325.
- Machiwal D., Madan K., and Mal B.C. 2006. Modelling infiltration and quantifying spatial soil variability in a wasteland of Kharagpur, *India Biosystems Engineering*, 95(4): 569-582.
- Mamdani E.H. 1976. Advances in linguistic synthesizes of fuzzy controllers. *International Journal of Man-Machine Studies*, 8: 669-678.
- Mbagwu J.S.C., 1997. Quasi-steady infiltration rates of highly permeable tropical moist savannah soils in relation to landuse and pore size distribution. *Soil Technology*, 11: 185-195.
- Mohammadi M.H., and Refahi H. 2005. Estimation of infiltration through soil physical characteristics. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*, 36(6): 1391-1398. (In Persian)
- Nimm J.R., Schmidt K.M., Perkins K.S., and Stock JD. 2009. Rapid measurement of field-saturated hydraulic conductivity for areal characterization. *Vadose Zone Journal*, 8(1): 142-149.
- Noorzadeh M., Hashemi S.M., and Malakooti M.J. 2011. Continuous zoning of electrical soil conductivity-acidity based on fuzzy clustering for Qom plain. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 57: 199-207. (In Persian)

- Parchami-Araghi F., Mirlatifi S.M., Ghorbani Dashtaki S., and Mahdian M.H. 2013. Point estimation of soil water infiltration process using artificial neural networks for some calcareous soils. *Journal of Hydrology*, 481: 35-47.
- Poostizadeh N., Samani J.M., and Koorepazan Dezfooli. 2008. River flow prediction using fuzzy inference system. *Iranian Journal of Water Resources Research*, 4(5): 23-34. (In Persian)
- Poostizadeh N., Samani, J.M.V. and Dezfuli, AK. 2008. River flow forecasting using fuzzy inference system. *Iranian Journal of Water Resources Research*, 4 (2): 23-34. (In Persian)
- Rao A.R., and Srinivas V.V. 2005. Regionalization of watersheds by fuzzy cluster analysis. *Journal of Hydrology*, 318: 57-79.
- Rawls W.J., Brakensiek D.L., and Savabi, M.R. 1989. Infiltration parameters for rangeland soils. *Journal of Rangeland Management*, 42 (2): 139-142.
- Ren M., Wang B., Liang Q., and Fu G. 2010. Classified real-time flood forecasting by coupling fuzzy clustering and neural network. *International Journal of Sediment Research*, 25: 134-148.
- Reynolds W.D., Elrick D.E., and Youngs E.G. 2002. Ring or cylinder infiltrometers (vadose zone). In: Dane J.H., and Topp G.C. (Eds.), *Methods of Soil Analysis: Part 4, Physical Methods*. Soil Science Society of America, Inc. Madison, WI. pp: 818-820.
- Schaap M.G., Leij, F.J., van Genuchten M.Th. 2001. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, 251, 163-176.
- Shu C., and Ouarda T.B.M.J. 2008. Regional flood frequency analysis at ungauged sites using the adaptive neuro-fuzzy inference system. *Journal of Hydrology*, 349: 31-43.
- Singh V.P., ASCE F., Woolhiser D., and ASCE M. 2002. Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, 7(4): 270-285.
- Sohrabi T., and Paydar Z. 2005. *Irrigation Systems Design*. Tehran University Press.
- Turner E.R. 2006. Comparison of infiltration equations and their field validation with rainfall simulation. M.Sc. Thesis, University of Maryland, USA, 202p.
- Van De Genachte G., Mallants, D., Ramos J., Deckers A., and Feyen J., 1996. Estimating infiltration parameters from basic soil properties. *Hydrological Processes*, 10: 687-701.
- Vernieuwe H., Verhoest N.E.C., De Baets B., Hoeben R., and De Troch F.P. 2007. Cluster-based fuzzy models for groundwater flow in the unsaturated zone. *Advances in Water Resources*, 30: 701-714.

Estimation of Final Soil Infiltration Rate Using Fuzzy Clustering Algorithm, Nero Fuzzy (ANFIS) and Fuzzy Inference System (FIS) (A Case Study: Behshahr Plain, Galougah, Mazandaran, Iran)

Iman Saleh¹, Ataollah Kavian^{2*}, Zeynab Jafarian³, Reza Ahmadi⁴

(Received: April 2016 Accepted: September 2016)

Abstract

Infiltration plays an important role in surface and subsurface hydrology and it is a key factor in the rainfall and runoff equations. The use of new approaches that have no limitations of common theoretical and empirical methods to determine infiltration relationships, will minimize the necessity of time consuming and costly experiments to determine permeability values and will make it possible to estimate the functional values. In this regard, in the present study the amount of soil permeability was estimated in Behshahr plain of Galougah located in Mazandaran province, using Fuzzy Inference System (FIS), Fuzzy Clustering Algorithm (FCA) and Nero-Fuzzy (ANFIS); so that, initial soil moisture content, soil organic matter content and soil lime content were considered as input parameters, and final soil infiltration rate was considered as output parameters of the models. Finally, the results obtained by the three mentioned modes were compared to the observed values by single-ring approach. According to the achieved results, Nero-Fuzzy approach with a mean deviation of 0.0042 cm/min, BIAS value of 0.6754 cm/min, Root-Mean-Square Error of 1.2096 cm/min and correlation coefficient of 0.9233 showed the most appropriate performance to estimate soil infiltration rate among the studied models; while, Fuzzy Clustering Algorithm with a mean deviation of 0.0075 cm/min, BIAS value of 2.1165 cm/min, Root-Mean-Square Error of 2.0244 cm/min and correlation coefficient of 0.8776, and Fuzzy Inference System with a mean deviation of 0.0161 cm/min, BIAS value of 2.5042 cm/min, Root-Mean-Square Error of 2.4533 cm/min and correlation coefficient of 0.8167 were placed in the next ranks respectively. Also, the highest correlation between observed and estimated values was seen in Nero-Fuzzy model ($R^2=0.85$), and the two other studied models including Fuzzy Clustering Algorithm ($R^2=0.77$) and Fuzzy Inference System ($R^2=0.66$) are at the next ranks respectively. At the end of this research providing more data of soil physical and chemical characteristics as well as permeability amounts has been recommended in order to more accurate estimation of the studied models.

Keywords: Behshahr-Galougah, Permeability, Soil lime percentage, Soil moisture content, Soil organic matter

1- Ph.D Candidate, Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources

2- Associate Professor, Faculty of Natural Resources, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources

3- Associate Professor, Faculty of Natural Resources, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources

4- Former M.Sc Student in Watershed Management, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources

*Corresponding Author Email: ataollah.kavian@yahoo.com