

شبیه‌سازی الگوی خیس‌شدگی منطقه ریشه گیاهان تحت آبیاری قطره‌ای با استفاده از تکنیک شبکه‌های عصبی مصنوعی

کامران پروانک بروجنی

استادیار خاک‌شناسی، گروه کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرری و دانش آموخته واحد علوم و تحقیقات.

چکیده :

الگوی خیس‌شدگی خاک منطقه ریشه گیاهان (قطر و عمق خاک خیس خورده) در محل تخلیه قطره‌چکان‌ها تابعی از ویژگی‌های فیزیکی خاک، دبی و مدت زمان کاربرد آب می‌باشد. با توجه به گوناگونی فاکتورهای مؤثر بر الگوی خیس‌شدگی خاک منطقه ریشه گیاهان تحت آبیاری قطره‌ای و قابلیت شبکه‌های عصبی مصنوعی به نظر می‌رسد با جمع‌آوری اطلاعات برای محدوده به نسبت وسیعی از تغییرات پارامترهای مؤثر بتوان شکل و روند پیشروی جبهه رطوبتی در خاک را پیش‌بینی کرد. در این تحقیق، در سال ۱۳۸۳ از خاک‌های اراضی زراعی حاشیه رودخانه زاینده رود اصفهان و برای ترکیب‌های مختلف متغیرها (شامل بافت لوم شنی و دبی‌های کاربردی ۲، ۴، ۸ و ۱۲ لیتر در ساعت با حجم آب آبیاری ۴۸ لیتر) ابتدا شکل و روند پیشروی جبهه رطوبتی با استفاده از یک مدل فیزیکی اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار Matlab Ver 7 یک شبکه عصبی مصنوعی با نام ANN-SL برای پیش‌بینی شکل و روند پیشروی جبهه رطوبتی در خاک و در محل تخلیه قطره‌چکان‌ها طراحی گردید. نتایج حاصل از مقایسه مدل فیزیکی با شبکه عصبی ANN-SL نشان داد که در این خاک برای هر چهار دبی کاربردی، شبکه عصبی ANN-SL به خوبی قادر به پیش‌بینی روند پیشروی جبهه رطوبتی می‌باشد. در شبکه‌ی طراحی شده، مقدار ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر ۰/۲۶۰۲ محاسبه شد. هم‌چنین ضریب تبیین شبکه‌ی $R^2 = 0/991$ به دست آمد. کوچک بودن RMSE و بزرگ بودن R^2 شبکه نشان می‌دهد که میزان هماهنگی بین روند تغییرات جبهه رطوبتی مشاهده شده از آزمایش‌ها و پیش‌بینی‌های شبکه‌ی عصبی بسیار خوب بوده است. آنالیز حساسیت روی پارامترهای ورودی به شبکه عصبی ANN-SL نشان داد که حذف پارامترهای حجم آب آبیاری و زمان آبیاری باعث ضعیف شدن عملکرد شبکه می‌شود؛ البته تأثیر حذف پارامتر حجم آب آبیاری در عملکرد شبکه زیاده‌تر از تأثیر حذف پارامتر زمان آبیاری می‌باشد. حذف خصوصیات فیزیکی خاک تأثیر اندکی در عملکرد شبکه دارد ($p < 0.05$) با توجه به نتایج به دست آمده، میزان خطای شبکه‌ی عصبی ANN-SL در برآورد روند پیشروی جبهه رطوبتی حدود یک درصد می‌باشد که در کارهای عملی آبیاری ناچیز است. لذا استفاده از شبکه‌ی عصبی ANN-SL برای پیش‌بینی الگوی خیس‌شدگی خاک منطقه ریشه گیاهان (وضعیت پیشروی جبهه رطوبتی) تحت آبیاری قطره‌ای در شرایط مشابه توصیه می‌شود.

کلمات کلیدی : الگوی خیس‌شدگی منطقه ریشه گیاهان، شبکه‌های عصبی مصنوعی، دبی آب آبیاری، مدل فیزیکی.

از جمله راه‌های تامین غذا و پوشاک جامعه‌ی بشری، افزایش سطح زیر کشت اراضی و میزان تولید محصولات کشاورزی است. عامل اساسی محدود کننده‌ی توسعه‌ی سطح زیر کشت اراضی کشاورزی، در بیش‌تر نقاط دنیا به ویژه مناطق خشک و نیمه خشک آب می‌باشد. امروزه تلاش گسترده‌ای در جهت افزایش کارایی مصرف آب صورت می‌گیرد. افزایش راندمان کاربرد آب در مزارع یکی از تلاش‌هایی است که در این زمینه بسیار مورد توجه قرار دارد. به این منظور روش‌های آبیاری تحت فشار و به ویژه آبیاری قطره‌ای به عنوان روش‌های مدرن آبیاری در حال توسعه می‌باشند. در ایران نیز تلاش برای توسعه‌ی سیستم‌های آبیاری تحت فشار و از جمله آبیاری قطره‌ای چشمگیر بوده است (علیزاده ۱۳۷۲).

طراحی آبیاری قطره‌ای و مدیریت این سیستم به منظور کاهش تلفات و استفاده مطلوب از آب و مواد مغذی خاک مستلزم آگاهی از چگونگی توزیع رطوبت در منطقه ریشه گیاهان می‌باشد. شکل (قطر و عمق خاک خیس‌خورده) و روند پیشروی جبهه رطوبتی در منطقه ریشه گیاهان در محل تخلیه قطره‌چکان‌ها تابعی از ویژگی‌های خاک (بافت، ساختمان و هدایت هیدرولیکی خاک)، شدت و مدت زمان کاربرد آب می‌باشد (خان و همکاران ۱۹۹۶). محققین با ارائه معادلات و مدل‌های فیزیکی و عددی گوناگون سعی در شبیه‌سازی چگونگی توزیع رطوبت در منطقه ریشه گیاهان نموده‌اند. براند و همکاران (۱۹۷۱) برای تحلیل نفوذ چند بعدی جریان از یک قطره‌چکان، روابط تئوریک ریاضی را توسعه دادند. آن‌ها به این منظور مدل جریان صفحه‌ای و جریان استوان‌های را در نظر گرفتند. فلچر و ویلسون (۱۹۸۳) یک مدل کامپیوتری برای توزیع رطوبت در زیر یک منبع نقطه‌ای در خاک‌های مطبق را ارائه دادند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها نیز تنها در دو شدت جریان کاربردی با نتایج مشاهده شده تطبیق داشت. تقوی و همکاران (۱۹۸۴) برای حل مسئله جریان غیر ماندگار آب در حالت دو بعدی تحت یک منبع آبیاری قطره‌ای، مدل المان محدود گالرکین را به کار بردند. مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی توسط حل عددی و داده‌های آزمایشگاهی خوب بود، ولی ناهم‌خوانی‌هایی نیز وجود داشت که آن‌ها عدم شناخت دقیق ارتباط بین هدایت هیدرولیکی و منحنی مشخصه رطوبتی خاک با پدیده مورد بررسی را عامل این ناهم‌خوانی‌ها دانستند. شوارتزمان و زور (۱۹۸۶) در تحقیقی برای تعیین فاصله بهینه خروجی‌ها و حجم خاک خیس‌خورده در منطقه ریشه گیاهان تحت آبیاری قطره‌ای، عمق خاک خیس شده و حداکثر عرض ناحیه خیس‌خورده را تابعی از حجم آب کابردی، دبی قطره‌چکان و هدایت هیدرولیکی خاک بیان نموده و یک رابطه تجربی را به این منظور ارائه داده‌اند. همامی و همکاران (۲۰۰۲) بر اساس معادلات نفوذ آب به خاک و پیوستگی، روشی عددی را برای پیش‌بینی عمق و شعاع حجم خاک خیس‌خورده‌ی ناشی از نفوذ آب از یک منبع نقطه‌ای ارائه نمودند.

آن‌ها نتیجه گرفتند که پیش‌بینی‌های انجام شده توسط مدل پیشنهادی و ارقام مشاهده شده هم‌خوانی خوبی دارند، ولی در زمان‌های آغازین و انتهایی نفوذ آب ناهم‌خوانی بین نتایج مشهود است. رحیمی خوب و همکاران (۱۳۷۹) با توجه به اهمیت موضوع، یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی موقعیت جبهه رطوبتی خاک در حین آبیاری با یک قطره‌چکان موضعی برای یک خاک همگن در شرایط ماندگار ارائه نمودند.

مطالعات لافولی و همکاران (۱۹۸۹)، هاورکمپ و همکاران (۱۹۹۴)، آر و کوئلهو (۱۹۹۶) و کوئلهو و آر (۱۹۹۷) نشان داده است که برخی مدل‌های عددی، ابعاد خاک خیس خورده‌ی منطقه ریشه گیاهان را در اثر نفوذ از یک منبع نقطه‌ای با دقتی قابل قبول پیش‌بینی می‌کنند؛ اما اغلب این مدل‌ها هنوز پیچیده بوده و کارایی عملی چندانی ندارند. برخلاف در دسترس بودن رایانه‌ها و مدل‌های گوناگون برای شبیه‌سازی نفوذ آب از یک منبع قطره‌ای، طراحان سیستم‌های آبیاری کمتر از مدل‌های بیان شده استفاده می‌کنند. بخشی از این استقبال نکردن ناشی از حجم فوق‌العاده زیاد و متنوع داده‌های مورد نیاز برای اجرای مدل‌ها است که به طور غالب امکان دسترسی به همه‌ی آن‌ها وجود ندارد. بخش دیگری از این دلایل مربوط به فقدان نرم‌افزارهای شبیه‌ساز و نیز لوازم جانبی مناسب می‌باشد.

شکوفایی علوم طبیعی و فنی در چند قرن گذشته تا حد زیادی مدیون مطالعات تجربی و مدل‌سازی پدیده‌های طبیعی است. مفاهیم اساسی از اکتشافات فیزیکی به عنوان نتیجه‌ی این شکوفایی به وجود آمد. توسعه‌ی روش‌های تحلیل اطلاعات و سیستم‌های هوشمند در قرن گذشته، این ایده را قوت بخشیده که جهش‌های علمی بعدی، در توسعه‌ی سیستم‌های هوشمندی استوار خواهد بود که مدل‌هایی از پدیده‌های طبیعی را به طور اتوماتیک و آن‌گونه که هستند توسعه بخشیده و در نهایت قادر خواهند بود آن‌ها را در قالب قوانین فیزیکی و به صورت روابط خلاصه شده فرموله کنند. این هدف در حال حاضر در زمینه‌های مختلف حاصل گردیده است. دیدگاه جدید شبکه‌های عصبی مصنوعی در دهه ۱۹۴۰ مطرح شد. در این زمان مک کلوج و پیترز (۱۹۴۳) نشان دادند که شبکه‌های عصبی مصنوعی را می‌توان برای محاسبه هر تابع حسابی و منطقی به کار گرفت. نخستین کاربرد عملی شبکه‌های عصبی مربوط به اواخر دهه ۱۹۵۰ بود که روزنبلات (۱۹۵۸) شبکه‌های چند لایه‌ای پرسپترون را معرفی نمود. در هر صورت دانش شبکه‌های عصبی، چشمگیرترین پیشرفت خود را در طول ۱۵ سال گذشته با ورود کامپیوترهایی با سرعت و ظرفیت محاسباتی بالا نشان داده است و محققین گوناگونی در زمینه‌های مختلف از شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده کرده‌اند.

مطالعات کارایانیس و ونتساناپولوس (به نقل از فوست ۱۹۹۴) نشان داد که یک شبکه عصبی مصنوعی در برگیرنده‌ی تعداد زیادی از اجزای ساده یک فرایند است که نرون‌ها، واحدها، سلول‌ها یا گره نامیده می‌شوند. هر نرون یا گره از طریق رابط‌های مستقیم تبادلاتی که هرکدام با یک فاکتور وزنی (که نشان دهنده سهم هریک از اطلاعات ورودی به گره‌های مورد استفاده در شبکه برای حل مسئله است) با سایر گره‌ها مرتبط می‌گردد.

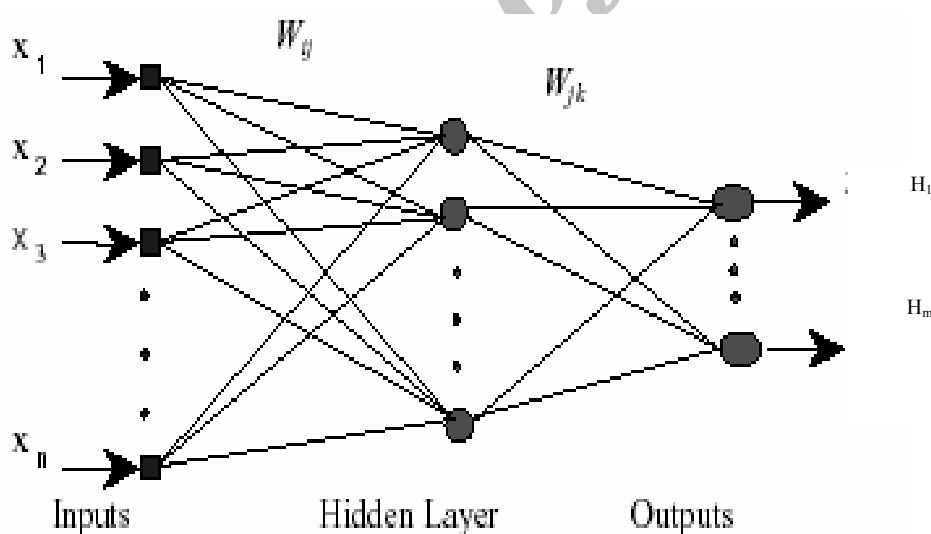
(شکل ۱) - هر شبکه به طور معمول دارای دو یا تعداد بیشتری لایه از واحدهای عملیاتی است به گونه‌ای که هر واحد عملیاتی در هر لایه با تمام واحدهای عملیاتی در لایه‌های مجاور مرتبط است. اگر ساختار یک شبکه عصبی مصنوعی را در فرم ریاضی به عنوان تقریبی از یک تابع چند متغیره مانند $h(X)$ به وسیله تابع دیگری مانند $H(W,X)$ در نظر بگیریم، با در اختیار داشتن بردار داده‌های ورودی:

$$(1) X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$$

و بردار فاکتورهای وزنی

$$(2) W = [w_1, w_2, \dots, w_m]$$

هدف یافتن $h(X)$ با حداقل خطا از طریق اصلاح پیاپی فاکتورهای وزنی W است که آموزش شبکه نامیده می‌شود. پس از آموزش شبکه با وارد نمودن مقادیر داده‌های ورودی جدید می‌توان مقدار تابع مورد نظر را تعیین نمود.



شکل ۱ ساختار شبکه‌ی عصبی مصنوعی چند لایه‌ای (فوست ۱۹۹۴)

هدف از انجام تحقیق حاضر عبارت است از :

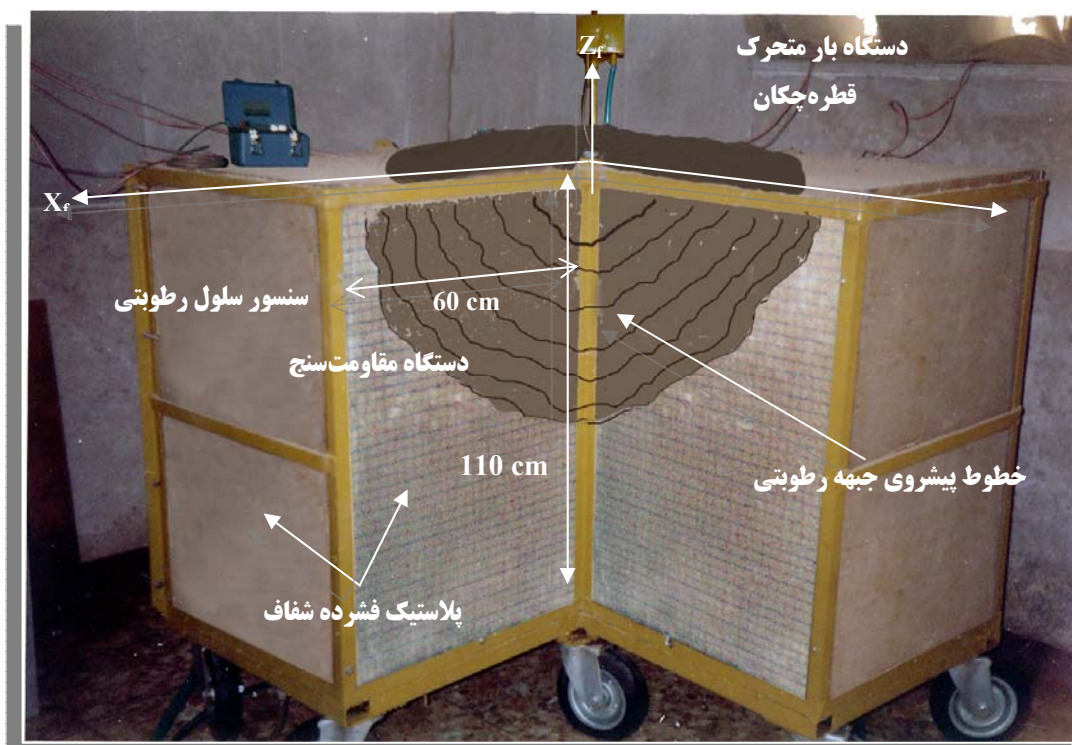
- ۱- اندازه‌گیری ابعاد الگوی خیس‌شدگی خاک منطقه ریشه گیاهان (عمق $[Z_f]$ و قطر $[X_f]$ توده خاک خیس شده) با استفاده از مدل فیزیکی برای شدت‌ها و مدت‌های مختلف کاربرد آب.
- ۲- طراحی شبکه‌ی عصبی مصنوعی برای تعیین ابعاد جبهه رطوبتی برای شدت‌ها و مدت‌های مختلف کاربرد آب و مقایسه و ارزیابی نتایج به دست آمده با مدل فیزیکی.

مواد و روش‌ها :

به منظور بررسی تاثیر خصوصیات فیزیکی خاک (بافت، هدایت هیدرولیکی و...) بر شکل و الگوی خیس‌شدگی منطقه ریشه گیاهان تحت آبیاری قطره‌ای، در یک مدل فیزیکی، در سال ۱۳۸۳ از خاک‌های اراضی زراعی حاشیه رودخانه زاینده‌رود اصفهان استفاده شد. نمونه‌برداری از اعماق صفر تا ۵۰ سانتی‌متری خاک در ۱۲ نقطه انجام شد و حدود ۲۰۰۰ کیلوگرم خاک تهیه و به آزمایشگاه منتقل شد. نمونه‌های خاک پس از پهن و خشک کردن در مجاورت هوا، به آرامی کوبیده و به منظور جمع‌آوری خاک‌دانه‌های پایدار (خاک‌دانه‌های دارای قطر ۸ میلی‌متر) از الک ۸ میلی‌متری عبور داده شدند. تجزیه‌های فیزیکی روی نمونه‌های خاک عبور داده شده از الک ۲ میلی‌متری بر طبق روش‌های استاندارد انجام شد [۱۴].

به منظور مشاهده‌ی مستقیم، اندازه‌گیری و ثبت روند پیشروی جبهه‌ی رطوبتی در خاک، لازم بود که از ورقه‌هایی از جنس پلاستیک فشرده شفاف استفاده شود. بنابراین پس از تهیه ورقه‌های Plexiglas، ورقه‌ها برش داده شده و به یکدیگر متصل گردیدند. ابعاد مدل فیزیکی با توجه به فواصل قطره‌چکان‌ها در شرایط متعارف و عمق ریشه گیاهان معمولی انتخاب شده‌اند. (شکل ۲) همچنین به منظور مشاهده و اندازه‌گیری موقعیت جبهه پیشروی رطوبت در امتداد محورهای سه گانه X_f ، Y_f و Z_f لازم است که از دو ضلع مدل فیزیکی از هر کدام یک قطعه به ابعاد ۹۰×۶۰ سانتی‌متری جدا شود. به عبارتی یک چهارم مدل (باکس) تهیه شده حذف گردید (البته لازم به ذکر است کلیه‌ی دبی‌های کاربردی در یک چهارم ضرب و سپس دبی بدست آمده برای حجم آب آبیاری ۴۸ لیتر به کار برده می‌شد). پس از ساخت مدل، در کف آن منافذی برای فراهم شدن امکان زهکشی آزاد خاک ایجاد و با لایه‌ای به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر از شن مخلوط پوشانده شد. سپس خاک عبور داده شده از الک ۸ میلی‌متری به صورت دستی به داخل محفظه مدل ریخته شد و به صورت یکنواخت در داخل آن پخش گردید. پس از ریختن مقداری خاک در داخل مدل، به کمک یک غلتک دستی به وزن ۸ کیلوگرم، خاک را چندین بار در جهت‌های مختلف غلتک زده تا تراکم یکنواخت ایجاد شود. عملیات فوق تا پرشدن کامل مدل ادامه یافت. به منظور بازگشت ساختمان خاک به حالت اولیه، خاک درون مدل یک بار با وارد نمودن آب از کف اشباع گردید و مدت یک هفته در هوای آزاد قرار داده شد تا رطوبت خود را از دست دهد. قبل از آبیاری، میزان رطوبت خاک

داخل مدل با استفاده از گیرنده‌های حساس به رطوبت که در عمق‌های ۱۵، ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متر جایگذاری شده بودند اندازه‌گیری می‌شد و هنگامی که متوسط مقاومت الکتریکی خوانده شده توسط سنسورها در عمق‌های مذکور، معادل ۵۰ درصد آب قابل استفاده را نشان می‌داد، با استفاده از قطره‌چکان و دستگاه بار متحرک دبی‌های ۲، ۴، ۸ و ۱۲ لیتر بر ساعت تنظیم و به کار برده شد. قطره‌چکان در مرکز مدل قرار داده شد. آبیاری برای حجم ثابت ۴۸ لیتر آب انجام شد. آزمایش برای هر شدت جریان سه بار انجام شد و میانگین اعداد در محاسبات منظور گردید. در طی آبیاری، موقعیت پیشروی جبهه‌ی رطوبتی که با تغییر رنگ خاک همراه است، از پشت دیواره پلکسی‌گلاس شفاف قابل دیدن بود. شکل ۲ نمایی از پیشروی جبهه رطوبتی را در حین یکی از آزمایش‌ها نشان می‌دهد. وضعیت پیشروی جبهه‌ی رطوبتی در امتداد محورهای سه گانه X_f ، Y_f و Z_f در زمان‌های مختلف، از زمان شروع تا پایان زمان آبیاری، با مازیک روی دیواره‌ی مدل علامت‌گذاری گردید. در نهایت، ۲۴ ساعت پس از قطع آبیاری با چسباندن کاغذ کالک شبکه‌بندی شده با شبکه‌های ۰/۵×۰/۵ سانتی‌متری روی صفحه پلکسی‌گلاس، خطوط جبهه‌های پیشروی رطوبت به طور مستقیم به صفحه کاغذ کالک منتقل شد. سپس از روی کاغذ کالک، برای هر کدام از خطوط جبهه پیشروی رطوبت قطر مقطع مرطوب شده (X_f) و عمق متناظر با آن مقطع اندازه‌گیری شد. با داشتن زمان رسم خطوط جبهه‌های پیشروی رطوبت و با استفاده از رابطه‌ی $v = q \cdot t$ که در آن q دبی کاربردی بر حسب لیتر بر ساعت و t زمان بر حسب ساعت است، v حجم آب آبیاری بر حسب لیتر برای هر جبهه پیشروی رطوبت محاسبه گردید. چون آزمایش‌های فوق‌الذکر برای اعمال هر دبی در محیط آزمایشگاه و در زمان کوتاهی انجام شد از تبخیر صرف نظر شده است.



شکل ۲ نمای مدل فیزیکی طراحی شده و موقعیت پیشروی جبهه‌ی رطوبتی تحت آبیاری قطره‌ای.

اطلاعات جمع‌آوری شده شامل شدت جریان، بافت خاک، وزن مخصوص حقیقی، وزن مخصوص ظاهری خاک، رطوبت اولیه خاک (در هر سه عمق)، زمان و X_f ، Y_f ، Z_f به صورت فایل‌های کامپیوتری ذخیره شد. با استفاده از نرم افزار Matlab ver 7، یک شبکه عصبی با نام ANN-SL طراحی و برای پیش بینی X_f و Y_f ، Z_f آموزش داده شد. شبکه‌ای که در این تحقیق به منظور برآورد موقعیت پیشروی رطوبتی خاک مورد استفاده قرار گرفت، از نوع شبکه‌های پرسپترون چند لایه^۱ می‌باشد که یادگیری این شبکه با استفاده از الگوریتم پس انتشار خطا و قانون یادگیری دلتا صورت می‌پذیرد. کارایی شبکه عصبی مصنوعی با نتایج مدل فیزیکی در تعیین ابعاد و مختصات جبهه‌ی رطوبتی ناشی از کاربرد آب با شدت‌های مختلف و برای زمان‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفت.

1-Multi layer perceptron (MLP)

معیارهای ارزیابی عملکرد شبکه عصبی طراحی شده :

به منظور ارزیابی شبکه طراحی شده و نحوه عملکرد آن نسبت به مقادیر اندازه گیری شده پیشروی جبهه رطوبتی از شاخص های زیر به عنوان معیار مقایسه استفاده گردیده است.

$$r = \frac{\sum (X_E - \bar{X}_E)(X_{ob} - \bar{X}_{ob})}{\sqrt{\sum (X_E - \bar{X}_E)^2 \sum (X_{ob} - \bar{X}_{ob})^2}} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (X_E - X_{ob})^2}{n}} \quad (4)$$

$$MAE = \frac{\sum |X_E - X_{ob}|}{n} \quad (5)$$

$$CI_{99\%} = MAE \pm 2.56 \left(\frac{SDAE}{n^{0.5}} \right) \quad (6)$$

$$SDAE = \sqrt{\frac{\sum (AE_i - \overline{AE})^2}{n}} \quad (7)$$

در این روابط :

r : ضریب همبستگی

RMSE: ریشه میانگین مربعات خطا^۱

MAE: میانگین قدر مطلق خطا^۲

CI99%: بانده اعتماد^۳ ۹۹ درصد میانگین قدر مطلق خطاها

SDAE: انحراف معیار^۴ قدر مطلق خطا

AE: قدر مطلق خطا^۵

\overline{AE} : میانگین قدر مطلق خطا

X_E : مقادیر پیش بینی شده توسط شبکه عصبی ANN-SL

- 1- Root mean square error (RMSE)^۱
- 2- Mean of absolute errors (MAE)
- 3- Confidence interval (CI)
- 4- Standard deviation (SD)
- 5- Absolute error (AE)



\bar{X}_E : متوسط مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی ANN-SL

X_{ob} : مقادیر واقعی \bar{X}_{ob} : متوسط مقادیر واقعی n: تعداد مشاهده ها

ضریب همبستگی شاخص مناسبی در نشان دادن میزان هماهنگی روند تغییرات مقادیر مشاهده شده و مقادیر پیش‌بینی شده است. دقت شبکه با نزدیک شدن r به +1 یا -1، عرض از مبدأ به سمت صفر و شیب معادله رگرسیون به سمت یک افزایش می‌یابد. شاخص RMSE در محدوده $[0+\infty]$ تغییر می‌کند و هرچه مقدار آن به صفر نزدیکتر باشد، عملکرد مدل بهتر ارزیابی می‌شود. MAE نیز در محدوده $[0+\infty]$ تغییر می‌کند و مدلی که دارای MAE کمتری باشد، از دقت بیشتری برخوردار است. به منظور مقایسه‌ی آماری میزان دقت شبکه‌های متفاوت، از باند اعتماد ۹۹ درصد ($CI_{99\%}$) میانگین قدر مطلق خطاها استفاده شده است. در صورتی که اختلاف بین مقادیر MAE در دو شبکه، در محدوده‌ی باند اعتماد ۹۹ درصد میانگین قدر مطلق خطای دو شبکه قرار گیرد، تفاوت نتایج حاصل از دو مدل یا به عبارتی اختلاف دقت دو مدل در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار نمی‌باشد.

نتایج و بحث:

نتایج تجزیه‌های فیزیکی خاک مورد مطالعه در جدول ۱ درج گردیده است. به طوری که ملاحظه می‌شود، بافت خاک مورد مطالعه سبک (لوم شنی) می‌باشد. جرم مخصوص ظاهری آن $1/68$ گرم بر سانتی‌متر مکعب و ضریب آبگذری اشباع آن $2/59$ سانتی‌متر در ساعت می‌باشد.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی خاک مورد مطالعه

رطوبت وزنی (%)		میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها (cm/hr)	ضریب آبگذری اشباع (cm/hr)	تخلخل (%)	جرم مخصوص ظاهری g/cm^3	بافت خاک
نقطه پژمردگی دائم	ظرفیت مزرعه					
۷/۱	۱۴/۵	۳/۹	۲/۹۵	۳۷/۵	۱/۶۸	لوم شنی

۱- نتایج حاصل از شبکه‌ی عصبی مصنوعی طراحی شده :

در شبکه ANN-SL پارامترهای ورودی شامل حجم آب آبیاری، زمان آبیاری و خصوصیات فیزیکی خاک (شامل ضریب آب‌گذری اشباع، رطوبت اولیه، میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها^۱، جرم مخصوص ظاهری، تخلخل، میزان رس، سیلت و شن خاک) و پارامتر خروجی قطر خیس شده جبهه‌ی رطوبتی می‌باشد. در شبکه ANN-SL، عمق خیس شده‌ی جبهه‌ی رطوبتی به صورت حلقه^۲ در بازه [۰-۱۰۰] سانتی‌متر با گام‌های ۰/۵ سانتی‌متر تعریف شده است. شبکه ANN-SL دارای یک لایه‌ی ورودی، یک لایه‌ی میانی و یک لایه‌ی خروجی است. جدول ۲ مشخصات شبکه طراحی شده را نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است که در شبکه طراحی شده، پارامترهای قابل تنظیم شامل نرخ یادگیری در لایه میانی و لایه خروجی، مومنتوم، وزن‌های اولیه در لایه‌های ورودی، میانی و خروجی توسط نرم‌افزار Matlab به صورت بهینه و دینامیک تعیین می‌شود. به عبارتی، این نرم‌افزار دارای این توانایی است که در طی فرایند یادگیری، پارامترهای قابل تنظیم را در بازه [۰،۱] تغییر می‌دهد و بهترین پارامتر یادگیری که کمترین ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) را ایجاد می‌نماید، انتخاب می‌کند.

جدول ۲- مشخصات شبکه طراحی شده ANN-SL.

اپاک	ورودی	تعداد نرون‌ها در لایه		
		ورودی	میانی	خروجی
۲۰۰۰	دو قطبی	۸	۱۶	۱

لایه‌ی خروجی شبکه‌ی طراحی شده دارای یک نرون است. انتخاب تعداد مناسب نرون‌های لایه‌های میانی و ورودی بر مبنای مقایسه‌ی بین عملکرد شبکه‌هایی با تعداد متفاوت نرون در لایه‌های میانی و ورودی انجام شده است. به این ترتیب که برای شبکه طراحی شده، شبکه‌هایی با تعداد متفاوت نرون (۱ تا ۳۰ نرون) در لایه‌های میانی و ورودی طراحی گردید. نتیجه‌ی تغییر تعداد نرون‌های لایه‌های میانی و ورودی روی RMSE شبکه ANN-SL در شکل ۳ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، شبکه ANN-SL به ازای تعداد ۱۶ و ۸ نرون به ترتیب در لایه‌های میانی و ورودی، دارای کمترین مقدار RMSE می‌باشد. لذا تعداد نرون‌های

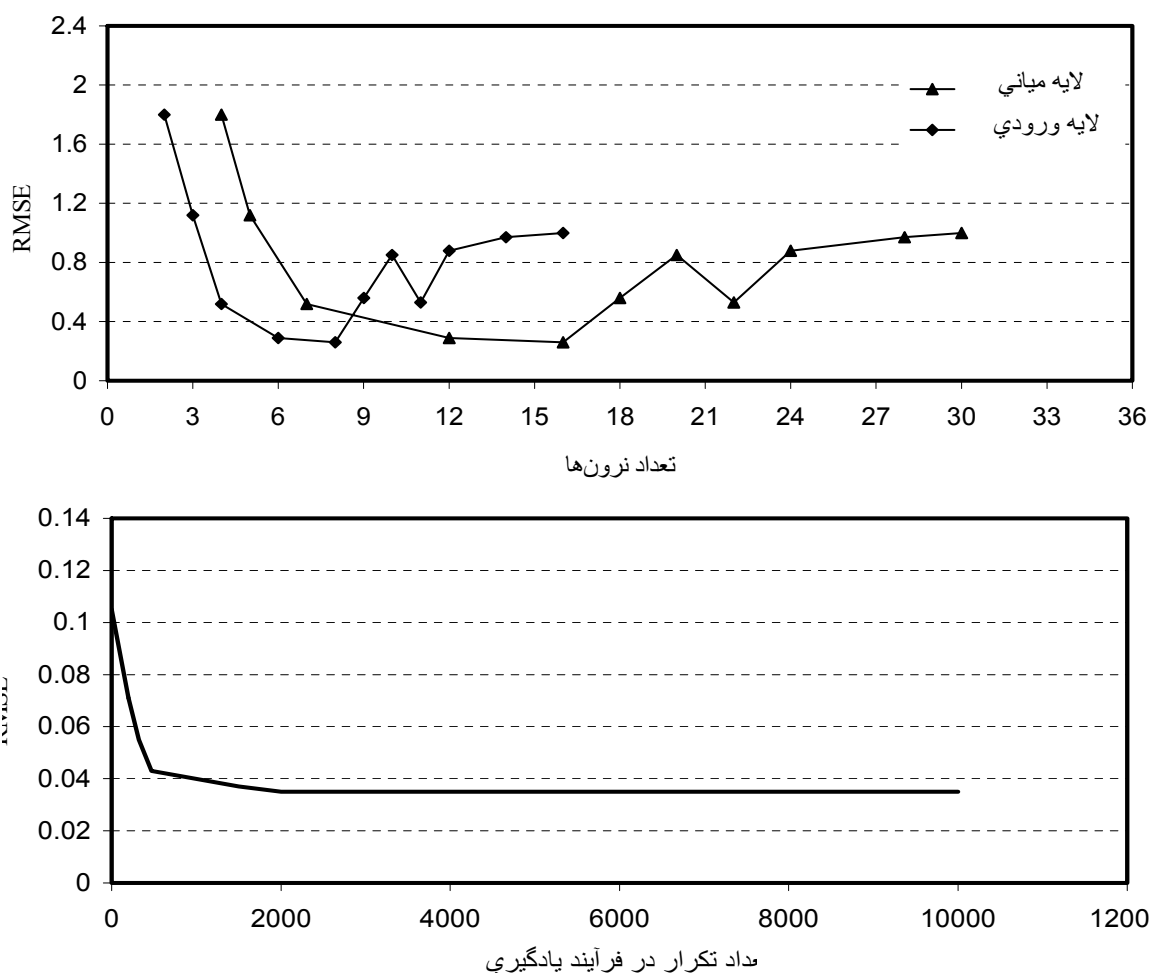
1- Mean weighted diameter (MWD)

2- Loop



لایه‌های میانی و ورودی به ترتیب ۱۶ و ۸ در نظر گرفته شد. به عبارتی شبکه ANN-SL یک شبکه ۸، ۱۶، ۱ می‌باشد که اعداد ۱، ۱۶ و ۸ به ترتیب تعداد مناسب نرون در لایه‌های خروجی، میانی و ورودی است. تغییرات RMSE شبکه ANN-SL، در طی فرایند یادگیری در شکل ۴ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود مقدار RMSE شبکه بیان شده به طور تقریبی به سمت یک عدد ثابت ۰/۰۳۵ حرکت می‌نماید. بنابراین پس از حدود ۲۰۰۰ بار تکرار الگوریتم پس انتشارخطا، RMSE هر شبکه به حدود ۰/۰۳۵ کاهش یافته و پس از آن کاهش چندانی مشاهده نمی‌شود. با وجود این، برای اطمینان از پایداری شبکه‌ی طراحی شده، یادگیری آن‌ها تا ۱۰۰۰۰ بار تکرار الگوریتم پس انتشار خطا ادامه یافته است.

شکل ۳- تعداد نرون‌های لایه‌های میانی و ورودی بر تغییرات RMSE در شبکه ANN-SL.



جدول ۳ مقادیر شاخص‌های آماری که در ارزیابی عملکرد شبکه ANN-SL استفاده شده ارائه گردیده است. بررسی شاخص‌های آماری RMSE و SDAE میان قطر مشاهده شده، و قطر پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی ANN-SL برای زمان‌های مختلف آبیاری نشان می‌دهد که مقدار RMSE و SDAE شبکه عصبی ANN-SL بسیار کم است به ترتیب ۰/۲۶۰۲ و ۰/۱۵۷۱. کم بودن مقدار RMSE و SDAE شبکه بیان‌گر آن است که دقت شبکه عصبی ANN-SL برای پیش‌بینی روند پیشروی جبهه رطوبتی (پیش‌بینی قطر و عمق خیس شده جبهه رطوبتی) قابل قبول است.

محاسبه معادله خطی و ضریب تبیین بین تمامی مقادیر قطر مشاهده شده از آزمایش‌ها و قطر پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی ANN-SL، نشان داد که ضریب تبیین برابر $R^2 = 0/991$ می‌باشد (جدول ۳). بالا بودن میزان ضریب تبیین نشان دهنده هماهنگی بسیار خوب بین روند تغییرات مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی می‌باشد. هم‌چنین بررسی میزان a و b (به ترتیب عرض از مبدأ و شیب خط رگرسیون) نشان می‌دهد که در شبکه عصبی ANN-SL مقدار b به صفر و مقدار a به یک بسیار نزدیک است که می‌تواند دلیل دیگر بر توانایی بسیار زیاد شبکه عصبی ANN-SL در برآورد قطر و عمق خیس شده جبهه‌ی رطوبتی باشد.

جدول ۳- مقادیر شاخص‌های آماری مورد استفاده در ارزیابی عملکرد شبکه عصبی ANN-SL.

99%CI of MAE	SDAE	MAE	RMSE	a	b	R^2	Statistical factor	Network
0/166	0/253	0/1571	0/2112	0/2602	0/994	0/101	0/991	ANN-SL

به منظور مقایسه آماری میزان دقت شبکه ANN-SL، از شاخص باند اعتماد ۹۹ درصد میانگین قدر مطلق خطا (CI 99%) استفاده گردید. نتیجه‌ی این محاسبه در جدول ۳ ارائه شده است. بررسی این شاخص نشان می‌دهد که به احتمال ۹۹ درصد، قدر مطلق خطا در شبکه عصبی ANN-SL در این باند اعتماد قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر، می‌توان گفت که در سطح احتمال ۱ درصد بین وضعیت پیشروی جبهه‌ی رطوبتی پیش‌بینی شده، توسط شبکه عصبی و مشاهده شده از آزمایش‌ها اختلاف معنی‌داری وجود ندارد و این دلیلی دیگر بر دقت بسیار زیاد شبکه ANN-SL در پیش‌بینی وضعیت پیشروی جبهه رطوبتی می‌باشد که در شکل ۵ قابل تأیید است. همان گونه که در قسمت‌های مختلف این شکل مشاهده می‌شود، منحنی‌های پیشروی جبهه رطوبتی پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی ANN-SL به طور کامل با مقادیر مشاهده شده از آزمایش‌ها نزدیک می‌باشند.

همچنین نتیجه‌ی تجزیه و تحلیل آماری آزمون t بین مقادیر قطر خیس شده جبهه رطوبتی که توسط شبکه‌ی عصبی ANN-SL پیش‌بینی شده و مقادیر قطر مشاهده شده از آزمایش‌ها نشان داد که در سطوح احتمال ۱ و ۵ درصد تفاوت بین مقادیر آن‌ها معنی‌دار نیست. نتایج این تجزیه و تحلیل آماری در جدول ۴ ارائه شده است. در ضمن در آزمون t انجام شده، در ابتدا آزمون برابری واریانس‌ها در سطح احتمال یک درصد انجام شد.

جدول ۴- نتایج آزمون t بین مقادیر قطر جبهه رطوبتی مشاهده شده و پیش‌بینی شده با شبکه عصبی

ANN-SL

t	انحراف معیار	میانگین	تیمار
۰۰/۲۵۷۶۳ ^{ns}	۱۷/۶۷۳۹	۳۳/۶۲۳۲	قطر مشاهده شده
	۱۷/۴۷۳۱	۳۳/۶۸۶۸	قطر پیش‌بینی شده

ns: در تمام سطوح احتمال معنی‌دار نمی‌باشد.

۲- آنالیز حساسیت عملکرد شبکه‌ی عصبی ANN-SL:

به منظور مشاهده‌ی تأثیر حذف پارامترهای ورودی بر عملکرد شبکه عصبی ANN-SL، شبکه‌هایی که فاقد یک پارامتر ورودی باشند طراحی شده‌اند. در طراحی این شبکه‌ها، مقادیر قابل تنظیم (پارامترهای یادگیری و وزن‌های اولیه)، مقادیر به دست آمده برای شبکه ANN-SL بوده و هر شبکه با هشت پارامتر ورودی طراحی شده است. در نام‌گذاری این شبکه‌ها، حرف w نشان‌دهنده این است که شبکه مورد نظر فاقد پارامتر ذکر شده در جلوی این حرف می‌باشد. علاوه بر این، $V, T, K_s, B_d, \theta_i, n, \text{Clay}, \text{Silt}, \text{Sand}$ به ترتیب معرف حجم آب آبیاری، زمان آبیاری، ضریب آب‌گذری اشباع، جرم مخصوص ظاهری خاک، رطوبت اولیه‌ی خاک، تخلخل خاک، میزان رس، سیلت و شن خاک می‌باشند.

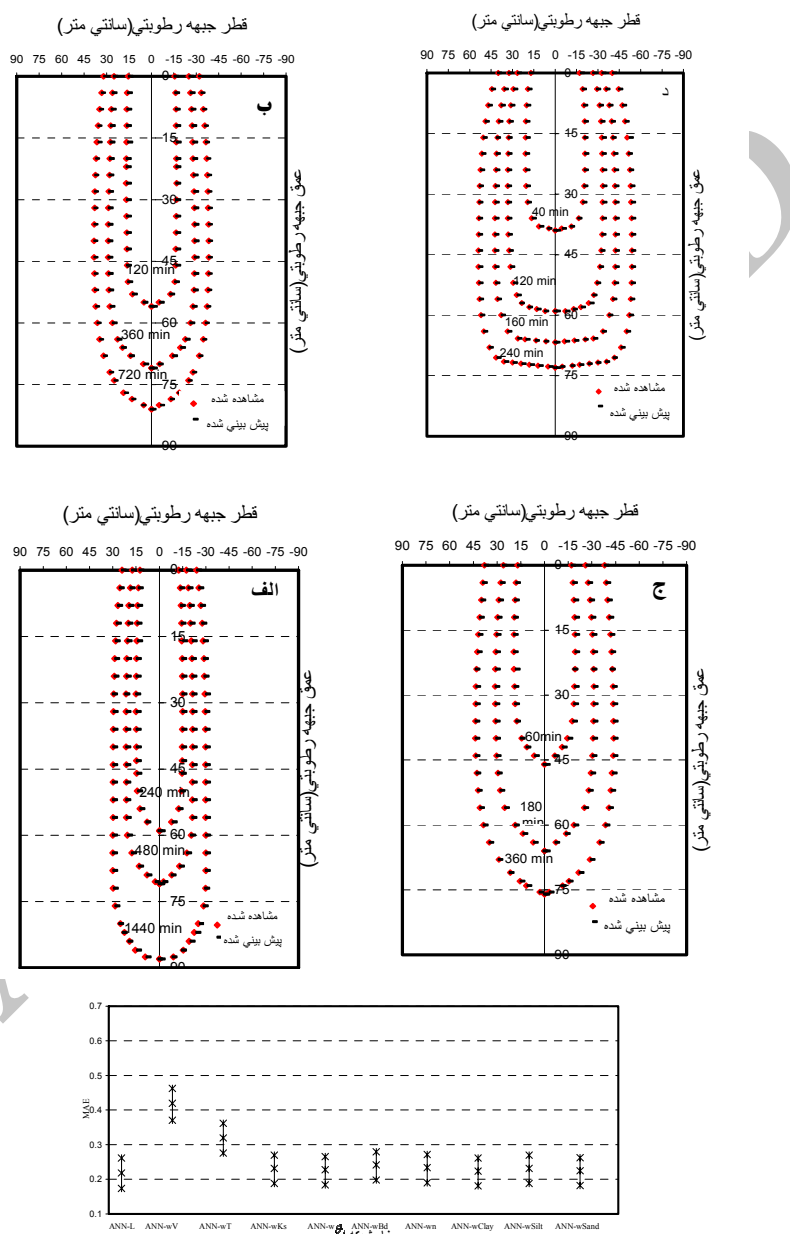
در شکل ۶ مقدار MAE و باند اعتماد ۹۵ درصد آن در شبکه عصبی ANN-SL و شبکه‌های طراحی شده با حذف تک تک پارامترهای ورودی نشان داده شده است. این شکل به نوعی تأثیر حذف پارامترهای ورودی را بر MAE شبکه نشان می‌دهد و این موضوع را نیز مشخص می‌نماید که آیا اختلاف در مقدار MAE ناشی از حذف پارامترهای ورودی، در سطح اعتماد ۹۵ درصد معنی‌دار است یا خیر. هم‌چنین این شکل نشان می‌دهد که با حذف پارامترهای حجم آب آبیاری و زمان آبیاری به صورت جداگانه، MAE شبکه‌ها افزایش یافته، عملکرد شبکه‌ها نسبت به شبکه ANN-SL ضعیف‌تر می‌شود. البته افزایش MAE و کاهش عملکرد شبکه فاقد حجم آب آبیاری بیش‌تر از شبکه فاقد زمان آبیاری می‌باشد. این نکته را می‌توان به این صورت تعبیر کرد که حجم آب آبیاری نسبت

به زمان آبیاری روی وضعیت پیشروی جبهه رطوبتی تأثیر بیش‌تری دارد و شبکه عصبی نیز توانسته است اثر این پارامتر را بر پیش‌بینی وضعیت پیشروی جبهه رطوبتی به خوبی لحاظ نماید.

هم‌چنین حذف هر کدام از خصوصیات فیزیکی خاک تأثیر چندانی بر MAE شبکه‌ها و عملکرد آن‌ها نسبت به شبکه ANN-SL نداشته است، به عبارتی حذف پارامترهای ورودی خصوصیات فیزیکی خاک باعث ایجاد تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد بین MAE شبکه حاصل و شبکه ANN-SL نمی‌شود. این امر را می‌توان به این صورت تعبیر نمود که در تمام داده‌های مورد استفاده برای پیش‌بینی وضعیت پیشروی جبهه رطوبتی، مقدار در نظر گرفته شده برای خصوصیات فیزیکی خاک دارای یک مقدار ثابت می‌باشد که در مقابل سایر پارامترهای ورودی که دارای مقادیر متفاوتی می‌باشند تکرار می‌شود. به همین دلیل حذف آن‌ها نسبت به حذف پارامتر حجم آب آبیاری و زمان آبیاری تأثیر ناچیزی در عملکرد شبکه ایجاد کرده است. ولی در صورتی که داده‌هایی با مقادیر متفاوت برای خصوصیات فیزیکی خاک (خاک‌هایی با خصوصیات فیزیکی متفاوت) تهیه و جمع‌آوری گردد می‌توان انتظار داشت که حذف آن‌ها بر عملکرد شبکه تأثیر منفی خواهد داشت.

با جمع‌بندی تمامی موارد فوق می‌توان گفت که دقت شبکه عصبی ANN-SL در پیش‌بینی موقعیت پیشروی جبهه‌ی رطوبتی در مقایسه با مقادیر مشاهده شده برای بافت خاک لوم شنی و چهار تیمار دبی کاربردی بسیار زیاد بوده است. در خاتمه استفاده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی طراحی شده (شبکه ANN-SL) برای پیش‌بینی وضعیت پیشروی جبهه‌ی رطوبتی تحت آبیاری قطره‌ای به دلیل همبستگی کاملاً منطقی و معقول میان مقادیر پیش‌بینی از شبکه عصبی و مقادیر مشاهده شده از آزمایش‌ها در شرایط مشابه توصیه می‌شود.

شکل ۵- جبهه‌ی رطوبتی مشاهده شده و پیش‌بینی شده با شبکه‌ی عصبی ANN-SL در خاک لوم شنی با دبی کاربردی (الف) ۲، (ب) ۴، (ج) ۸ و (د) ۱۲ لیتر بر ساعت.



شکل ۶- MAE و باند اعتماد ۹۵ درصد آن در شبکه‌ی عصبی ANN-SL در مقایسه با شبکه‌های فاقد یک پارامتر ورودی.

۱. رحیمی خوب، ع.، ج. م. ولی سامانی. و س. م. بهبهانی. ۱۳۷۹. مدل ریاضی نفوذ آب در آبیاری قطره‌ای. مجله کشاورزی و عمران روستایی ۲ (۱ و ۲): ۳۳-۴۱.
۲. علیزاده، ا. ۱۳۷۲. اصول طراحی و عملیات آبیاری قطره‌ای. چاپ دوم، انتشارات دانشگاه امام رضا (ع)، ۵۳۹ صفحه.
3. Alikhan, A., M. Yitayew and W. Warrick. 1996. Field evaluation of water and solute distribution from a point source. *J. Irrig. and Drain. Eng.*, ASCE 122(4): 221-227.
4. Brandt, A., E. Bresler, N. Diner, J. Ben-Asher, J. Heller and D. Goldberg. 1971. Infiltration from a trickle source: I. Mathematical models. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35(5) : 675-682.
5. Bucks, D.A., F.S. Nakayama and A.W. Warrick. 1992. Principles, practices and potentialities of trickle irrigation. PP. 220-298. In: D. Hillel (Ed.), *Advances in Irrigation*, Academic Press, New York.
6. Coelho, E.F. and D. Or. 1997. Applicability of analytical solutions for flow from point sources to drip irrigation management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 1331-1341.
7. Fausett, L. 1994. *Fundamentals of neural networks, architectures, algorithms, and applications*. Prentice - Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey.
8. Fletcher, C. and T.V. Wilson. 1983. Computer model for moisture distribution in stratified soils under a trickle source. *Trans. ASAE* 26(6): 1704-1709.
9. Hammami, M., D. Hedi, B. Jelloul and M. Mohamed. 2002. Approach for predicting the wetting front depth beneath a surface point source: theory and numerical aspect. *J. Irrig. and Drain. Eng.* 51: 347-360.
10. Haverkamp, R., P.J. Ross, K.R.J. Smettem and J.Y. Parlange. 1994. Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 2. Physical-based infiltration equation. *Water Resour. Res.* 30: 2931-2935.
11. Lafolie, F., R. Guennelon and M.Th. Van Genuchten. 1989b. Analysis of water flow under trickle irrigation: II. Experimental evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53:



12. 1318-1323.

13. McCulloch, W. and W. Pitts. 1943. A logical calculus of the ideas imminent in nervous activity. Bull Math. Biophys. 5: 115-133.

14. Or, D. and E.F. Coelho. 1996. Soil water dynamics under drip irrigation: Transient flow and uptake models. Trans. ASAE 39(6): 2017-2025.

15. Page, A.L. 1992. Methods of Soil Analysis. ASA and SSSA Publishers, Madison, WI.

16. Rosenblatt, F. 1958. The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain. Psychological Review, 65: 75-165.

17. Schwartzman, M. and B. Zur. 1986. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. J. Irrig. and Drain. Eng., ASCE 112(3): 242-253.

18. Taghavi, S.A., M.A. Marino, and D.E. Rolston. 1984. Infiltration from trickle irrigation source. J. Irrig. and Drain. Eng., ASCE 110(4): 331-341.