



دانشگاه گورگان
فصلنامه علمی کشاورزی و منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد بیست و سوم، شماره پنجم، ۱۳۹۵
<http://jwsc.gau.ac.ir>

بررسی عملکرد روش برنامه‌نویسی بیان ژن در طراحی آرایش قطره‌چکان‌های سیستم‌های آبیاری قطره‌ای در مقایسه با معادلات تجربی

*حسین ریاحی‌مدوار^۱ و اکرم سیفی^۱

استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان

تاریخ دریافت: ۹۴/۴/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۴/۹

چکیده

سابقه و هدف: آرایش قطره‌چکان‌ها از مهم‌ترین و اساسی‌ترین پارامترهای طراحی و اجرای سیستم‌های آبیاری قطره‌ای است که تحت‌تأثیر الگوی توزیع رطوبت خاک قرار می‌گیرد. الگوی توزیع رطوبت خاک در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی تأثیر ویژه‌ای بر پارامترهای طراحی از قبیل آرایش قطره‌چکان‌ها و لوله‌های فرعی، محدوده توسعه ریشه گیاه، راندمان کاربرد آب در آبیاری قطره‌ای، توزیع نمک در خاک دارد. بنابراین ارائه روابط بین بافت خاک، دبی قطره‌چکان، حجم آب نفوذیافته به زمین، حجم خاک خیس شده و زمان برای تخمین قطر و عمق پیاز رطوبتی می‌تواند کمک شایانی در طراحی آرایش بهینه قطره‌چکان‌ها و مدیریت سیستم آبیاری نماید. از مهم‌ترین این روابط، معادلات طراحی تجربی می‌باشند که مبتنی بر تحلیل آزمایشگاهی و روش آنالیز ابعادی باکینگهام ارائه شده‌اند. همچنین در این زمینه چندین معادله تجربی ساده وجود دارد که ابعاد پیاز رطوبتی را برآورد می‌نمایند، اما اغلب آن‌ها در مقاصد کاربردی و طراحی دقیق نیازمند واسنجی ضرایب به‌صورت منطقه‌ای هستند و فاقد جداول طراحی کاربردی بهینه برای آرایش قطره‌چکان‌ها می‌باشند. هدف اصلی در پژوهش حاضر بررسی عملکرد روش برنامه‌نویسی بیان ژن در طراحی آرایش قطره‌چکان‌های سیستم‌های آبیاری قطره‌ای در ایران با دبی قطره‌چکان و بافت خاک مختلف در مقایسه با معادلات تجربی است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش از رویکرد برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) برای استخراج روابط بدون بعد الگوی توزیع رطوبت خاک با استفاده از مجموعه داده‌های دبی قطره‌چکان و بافت خاک استفاده شده است. برنامه‌نویسی بیان ژن در نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. در کد تهیه شده عملگرها و توابع قابل استفاده در فرآیند استخراج روابط عبارتند از: جمع، تفریق، ضرب، تقسیم، جذر، لگاریتم طبیعی، توان دو، تانژانت هایپربولیک، سینوس، کسینوس، تابع نمائی، تابع توانی، قدرمطلق، جزء صحیح و شرط که با استفاده از قابلیت برنامه‌نویسی بیان ژن توابع تولیدی را ارائه می‌دهند. در این پژوهش معادلات کاربردی به‌صورت توابعی از حجم آب کاربردی در زمان آبیاری، هدایت هیدرولیکی خاک و زمان با برنامه‌نویسی بیان ژن بهینه‌سازی شدند. نتایج GEP با داده‌های اندازه‌گیری شده و روابط تجربی مقایسه شد. در نهایت بر اساس نتایج تحلیل بهینه پارتو در برنامه GEP، جداول طراحی کاربردی برای انتخاب بهینه آرایش قطره‌چکان‌ها منطبق بر شرایط ایران و در محدوده دبی قطره‌چکان و بافت خاک تهیه و ارائه شد.

* مسئول مکاتبه: h.riahi@vru.ac.ir

یافته‌ها: مقایسه نتایج بهینه‌سازی با GEP و مجموعه روابط تجربی موجود در پیش‌بینی عمق توسعه پیاز رطوبتی نشان داد که دقت نتایج بهینه‌سازی مبتنی بر GEP نسبت به روابط تجربی قبلی بهتر است. نتایج معادلات شواتزمن و زار (۱۹۸۵) در تخمین عمق پیاز رطوبتی ($RMSE=0/12$ ، $MAPE=12\%$ ، $R^2=0/99$) و در برآورد قطر پیاز رطوبتی ($RMSE=0/19$ ، $MAPE=18/5\%$ ، $R^2=0/99$) پیاز رطوبتی ($RMSE=0/72$ ، $MAPE=92\%$ ، $R^2=0/97$) است که نتایج بهینه‌سازی GEP هم دقت بهتری داشته و همه با محدوده کاربردی وسیع‌تر قابلیت استفاده در انواع خاک‌های مختلف و قطره‌چکان‌های با دبی گسترده منطبق بر شرایط ایران را دارد. پس از تأیید دقت نتایج روابط حاصله از GEP، جداول طراحی کاربردی برای آرایش و فواصل قطره‌چکان‌های مختلف در خاک‌های شنی، سیلتی، لومی و رسی با اعماق متفاوت ارائه شده است.

نتیجه‌گیری: طبق نتایج، رویکرد بهینه‌سازی ژنتیکی نسبت به روابط قبلی دارای محدوده اعتبار وسیع‌تری می‌باشد (دبی ۱ تا ۵۰ لیتر در ساعت؛ عمق تا ۱۱۰ سانتی‌متر). همچنین با توجه به این‌که مدل GEP بر اساس مجموعه داده‌های آزمایشی منطبق بر شرایط قطره‌چکان‌های موجود در ایران بهینه‌سازی شده است و انواعی از شرایط مختلف کاربردی خاک و آب را در بر دارد، دقت مطلوب‌تری در تخمین الگوی توزیع رطوبت خاک در آبیاری قطره‌ای در ایران دارد. بنابراین استفاده از روابط ارائه شده با مدل GEP می‌تواند عدم قطعیت‌ها و خطاها در طراحی سیستم آبیاری قطره‌ای را کاهش داده و به بهبود کارایی مصرف آب و عملکرد این سیستم‌ها در شرایط عملکردی ایران کمک نماید.

واژه‌های کلیدی: آبیاری قطره‌ای، الگوی توزیع رطوبت خاک، برنامه‌نویسی بیان ژن، جداول طراحی، آرایش قطره‌چکان‌ها

مقدمه

خاک اطراف قطره‌چکان است (۲۳). نفوذ و پیشروی آب در خاک از مهم‌ترین پارامترهای طراحی سیستم‌های آبیاری می‌باشد. نفوذ آب در خاک از منبع نقطه‌ای در سطح خاک و زیر سطح خاک و گسترش پیاز رطوبتی آن بستگی به عوامل زیادی دارد، از جمله این عوامل بافت خاک و چگالی ظاهری می‌باشد. در آبیاری قطره‌ای، فاصله بین قطره‌چکان‌ها در ردیف درخت بر اساس شکل الگوی پیاز رطوبتی و مساحتی که هر قطره‌چکان خیس می‌کند انتخاب می‌شود. بنابراین گسترش جبهه رطوبتی که به اصطلاح پیاز رطوبتی نامیده می‌شود، از پارامترهای تأثیرگذار بر انتخاب قطره‌چکان بوده و تعیین مقدار دقیق آن در طراحی صحیح سیستم‌های آبیاری قطره‌ای ضروری می‌باشد (۱۶). در پروژه‌های طراحی لازم است که ابعاد حجم خاک خیس شده زیر هر قطره چکان با دبی و حجم آب خروجی مشخص،

با توجه به این‌که کشور ما جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک بوده و همچنین راندمان و کارایی مصرف آب در سیستم‌های آبیاری سنتی نیز پایین است، بنابراین استفاده از روش‌های آبیاری مدرن و دقیق هم‌چون آبیاری قطره‌ای تحت فشار، که از کارایی مصرف آب بالای برخوردار باشند از راهکارهایی است که در صورت طراحی و اجرای مناسب، راندمان کاربرد آب را بالا برده و کشاورزی پایدار را نیز تأمین می‌نماید (۱). طراحی سیستم‌های آبیاری قطره‌ای شامل انتخاب ترکیب مناسبی از دبی قطره‌چکان‌ها و فواصل بین آن‌ها برای هر خاک و گیاه مشخص و شرایط اقلیمی و در نهایت آرایش بهینه قطره‌چکان‌ها است و مستلزم شناخت مطلوب الگوی خیس‌شدگی، توزیع رطوبت و گسترده‌گی شکل حجم خیس‌شده

قطره‌چکان‌ها (۱۷)، ارائه روشی برای محاسبه تغییرات زمانی شعاع خیس‌شدگی در آبیاری قطره‌ای (۲۴)، مقایسه رگرسیون خطی و شبکه‌های عصبی مصنوعی در برآورد ابعاد پیاز رطوبتی در اراضی شیب‌دار (۲۵)، برآورد ابعاد پیاز رطوبتی با مدل تجربی و مدل عددی HYDRUS-2D در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (۱۱)، توزیع رطوبت خاک بین دو قطره‌چکان در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با مدل HYDRUS-2D (۷)، ارزیابی مدل‌های HYDRUS-2D و SEEP/W در برآورد پیاز رطوبتی آبیاری قطره‌ای ثقلی سطحی و زیرسطحی (۴) و آنالیز ابعادی و استخراج روابط بدون بعد پیاز رطوبتی (۱۳) مورد بررسی قرار گرفته است.

بنابراین ارائه روابطی بین بافت خاک، دبی قطره‌چکان، حجم آب نفوذ یافته به زمین، حجم خاک خیس‌شده و زمان برای تخمین قطر و عمق پیاز رطوبتی کمک زیادی به طراحی و مدیریت یک سیستم آبیاری می‌نماید. یکی از مهم‌ترین این روابط، معادلات شواترمن و زار (۱۹۸۵) می‌باشند که مبتنی بر تحلیل آزمایشگاهی و روش آنالیز ابعادی باکینگهام ارائه شده‌اند (۲۵) و توسط پژوهشگران مختلفی نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند (۱۲، ۱۷، ۲۳، ۲۴). در جدول ۱ مجموعه روابط ارائه شده توسط پژوهشگران مختلف در انواع خاک‌ها، آورده شده است. شواترمن و زار (۱۹۸۵) با استفاده از داده‌های تجربی برسلر (۱۹۸۷) این روابط را به صورت زیر ارائه نمودند (۲):

$$D = 1.82(V_w)^{0.22} \left(\frac{K_s}{q}\right)^{-0.17} \quad (1)$$

که در آن، D عرض یا قطر الگوی خیس‌شدگی خاک (m)، Z فاصله قائم تا جبهه رطوبتی (m)، V_w حجم آب استفاده‌شده (m^3) ($V_w = q \cdot t$)، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ($m \cdot s^{-1}$)، و q دبی قطره‌چکان نقطه‌ای ($m^3 \cdot s^{-1}$) است و در نهایت حداکثر قطر جبهه رطوبتی برابر است با:

در این شکل، θ درصد رطوبت حجمی، t زمان، Z و I به ترتیب مختصات افقی و قائم است. زیرنوس i مربوط به شرایط اولیه و s مربوط به شرایط اشباع جبهه رطوبتی است. با توجه به اهمیت پدیده پیش‌روی جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای و تأثیراتی که این فرآیند در مدیریت بهینه آبیاری قطره‌ای و افزایش بازده آن دارد، پژوهش‌های بسیار وسیعی در سراسر دنیا روی این موضوع انجام شده است. در این زمینه پژوهشگران مختلفی اقدام به مدل‌سازی عددی نفوذ آب در خاک تحت سیستم آبیاری قطره‌ای نموده و با حل عددی معادلات یک یا دوبعدی جریان اشباع/غیراشباع آب در خاک شکل پیاز رطوبتی را شبیه‌سازی نموده‌اند. از این جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: مدل‌سازی دوبعدی پروفیل خیس‌شده خاک در نرم‌افزار HYDRUS-2D (۲۲)، مدل‌سازی دو و سه‌بعدی جبهه رطوبتی با مدل HYDRUS-2D/3D در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی لوله‌های تراوا (۲۱)، مدل‌سازی دوبعدی نفوذ آب در آبیاری قطره‌ای با مدل SEEP/W (۱۸)، مدل‌سازی دوبعدی الگوی خیس‌شدگی با مدل SWMS-2D در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (۲۶)، ارائه روابط نیمه‌تجربی جبهه رطوبتی (۱۳، ۱۶، ۱۷، ۱۹، ۲۰)، مقایسه نتایج مدل‌های عددی-تحلیلی و روابط تجربی پیاز رطوبتی (۷)، تحلیل عددی اثرات بافت خاک رطوبت اولیه و دبی قطره‌چکان بر ابعاد پیاز رطوبتی (۱۵) با مدل HYDRUS-2D/3D، بازبینی مدل‌های برآورد ابعاد پیاز رطوبتی (۲۳)، مقایسه الگوی خیس‌شدگی در آبیاری قطره‌ای منبع نقطه‌ای و خطی در خاک لوم ماسه‌ای (۲۷)، بررسی تأثیر دو عمق نصب قطره‌چکان با دبی‌های یکسان بر توزیع رطوبت در سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و شبیه‌سازی آن با مدل HYDRUS-2D (۶)، توزیع مجدد جبهه پیش‌روی آب در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی (۸)، ارزیابی مدل شواترمن و زار در تعیین فاصله

$$D = 1.32(Z)^{0.35} (q)^{0.33} (K_s)^{-0.33} \quad (2)$$

بنابراین در معادلات شوارتزمن و زار (۱۹۸۵) عمق و قطر ماکزیمم خاک خیس شده تابعی از دبی خروجی، هدایت هیدرولیکی اشباع و مدت زمان آبیاری است و با استفاده از آن‌ها می‌توان ابعاد جبهه رطوبتی را برآورد نمود (۱۹). همان‌گونه که بیان شد ضرایب مدل شوارتزمن و زار (۱۹۸۵) بر اساس تحلیل ابعادی تعیین شده است و این مدل برای محدوده داده‌های برسلا (۱۹۷۸) قابل استفاده است (۱۹، ۲). اغلب این روابط در مقاصد کاربردی و

طراحی دقیق نیازمند واسنجی ضرایب به صورت منطقه‌ای است و فاقد جداول طراحی کاربردی بهینه برای آرایش قطره‌چکان‌ها می‌باشند. هدف اصلی پژوهش حاضر ارزیابی عملکرد روش برنامه‌نویسی بیان ژن به منظور طراحی آرایش قطره‌چکان‌ها در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای در ایران در مقایسه با معادلات تجربی و همچنین ارائه جداول بهینه‌سازی شده در طراحی کاربردی فواصل و عمق کارگذاری قطره‌چکان‌ها بر مبنای دبی و بافت‌های خاک مختلف مناسب برای شرایط ایران است.

جدول ۱- روابط تجربی تخمین ابعاد پروفیل خیس‌شدگی خاک.

Table 1. Empirical equations for estimation of soil wetting profile dimensions.

منبع Reference	معادله قطر d^* Radius Eq.	معادله عمق Z^* Depth Eq.	بافت خاک Soil Texture.
سینگ و همکاران (۲۰۰۶) Sing et al. (2006)	$3.27(V^*)^{0.44}$	$3.86(V^*)^{0.31}$	لوم- شنی Loam-Sand
شوارتزمن و زار (۱۹۸۵) Schwartzman and Zur (1985)	$1.82(V^*)^{0.22}$	$2.54(V^*)^{0.63}$	لومی، شنی Loam. Sand
پلنگی و آخوندعلی (۲۰۱۱) Palangi and AkhondAli (2011)	$2.24(V^*)^{0.33}$	$1.71(V^*)^{0.44}$	شنی Sand
خلیلی و همکاران (۲۰۱۴) Khalili et al. (2014)	$7.52(V^*)^{0.56}$	$2.83(V^*)^{0.63}$	لومی Loam
ناجلیک و همکاران (۲۰۱۴) Naglič et al. (2014)	$1.56(V^*)^{0.29}$	$1.71(V^*)^{0.41}$	شن، لوم - رس - سیلت Sand, Loam, Clay, Silt
میرزائی و همکاران (۲۰۰۵) Mirzaei et al. (2005)	$2.12(V^*)^{0.46}$	$2.28(V^*)^{0.58}$	--
پلنگی و آخوندعلی (۲۰۰۸) Palangi and AkhondAli (2008)	$2.22(V^*)^{0.33}$	$1.78(V^*)^{0.43}$	شنی Sand
خان‌محمدی و بشارت (۲۰۱۳) Khanmohamadi and Besharat (2013)	$1.3(V^*)^{0.34}$	$1.44(V^*)^{0.44}$	لوم Loam

هیدرولیکی اشباع خاک (k_s)، دبی قطره‌چکان (q) و کل حجم آب وارد شده به خاک (V) بستگی دارد. شکل هندسی پیاز رطوبتی توسط دو پارامتر قطر خاک خیس شده (d) و عمق خاک خیس شده (Z) به صورت زیر تعریف می‌شود:

مواد و روش‌ها

مدل‌سازی الگوی رطوبت خاک و داده‌های پژوهش: بر اساس قوانین فیزیکی حاکم بر حرکت آب خاک در اطراف یک منبع نقطه‌ای، شکل هندسی حجم خاک خیس شده در پایان هرآبیاری به هدایت

مجموعه داده‌های آزمایشگاهی و صحرایی موجود استفاده شده است. در جدول ۲ مشخصات دقیق داده‌ها و اطلاعات مورد استفاده در پژوهش ارائه شده است. داده‌ها و اطلاعات پژوهش مربوط به چند مزرعه آزمایشی و مطالعاتی مختلف در سرتاسر ایران در شرایط متفاوت گردآوری شده است. مزرعه اول باغ مطالعاتی دانشگاه ارومیه است که تحت سیستم آبیاری قطره‌ای T-Tape با قطر لوله ۲ سانتی‌متر و فواصل قطره‌چکان یک متر بوده است. مجموعه دوم مربوط به مزرعه پردیس کشاورزی و مناطق طبیعی دانشگاه تهران واقع در کرج با سیستم آبیاری قطره‌ای Tape است. مورد سوم مربوط به ایستگاه تحقیقاتی منابع طبیعی استان خوزستان واقع در تپه‌های الباجی با سیستم آبیاری قطره‌ای میکروتیوب است و مجموعه آخر مربوط به یک قطعه آزمایشی تحت سیستم آبیاری قطره‌ای در قائم‌آباد کرمان است (۱۰، ۱۳، ۱۷). پارامترهای مورد استفاده در مدل بهینه‌سازی GEP، همان متغیرهای مدل شوارتزمن و زار یعنی دبی قطره چکان، هدایت هیدرولیکی اشباع، زمان آبیاری، حجم آبیاری، حداکثر قطر خیس شده پیاز رطوبتی و حداکثر عمق خیس شده پیاز رطوبتی می‌باشند که به‌عنوان دو خروجی به مدل معرفی شده‌اند و بهینه‌سازی الگوریتم توزیع رطوبتی با برنامه‌نویسی بیان ژن انجام شد.

$$d=f_1(V,q,k_s) \quad (3)$$

$$z=f_2(V,q,k_s) \quad (4)$$

در قوانین فوق طبق تئوری ابعادی باکینگهام، ۵ متغیر با دو بعد وجود دارد و بنابراین سه پارامتر بدون بعد به‌صورت زیر حاصل می‌شود:

$$v^* = v \left(\frac{K_s}{q} \right)^{1.5} \quad (5)$$

$$z^* = z \left(\frac{K_s}{q} \right)^{0.5} \quad (6)$$

$$d^* = d \left(\frac{K_s}{q} \right)^{0.5} \quad (7)$$

در حالت کلی فرم بدون بعد و غیرخطی روابط را می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود (۲۷):

$$d^* = \alpha (V^*)^\beta \quad (8)$$

$$z^* = \gamma (V^*)^\theta \quad (9)$$

که در آن، α ، β ، γ و θ ضرایب هستند و در این پژوهش با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی مربوط به نیمرخ جبهه رطوبتی تحت قطره‌چکان‌های موجود در شرایط خاک‌های ایران و با روش بهینه‌سازی برنامه‌نویسی بیان ژن تعیین شد. بدین‌منظور از

جدول ۲- مشخصات داده‌های مورد استفاده در تدوین مدل برنامه‌نویسی بیان ژن.

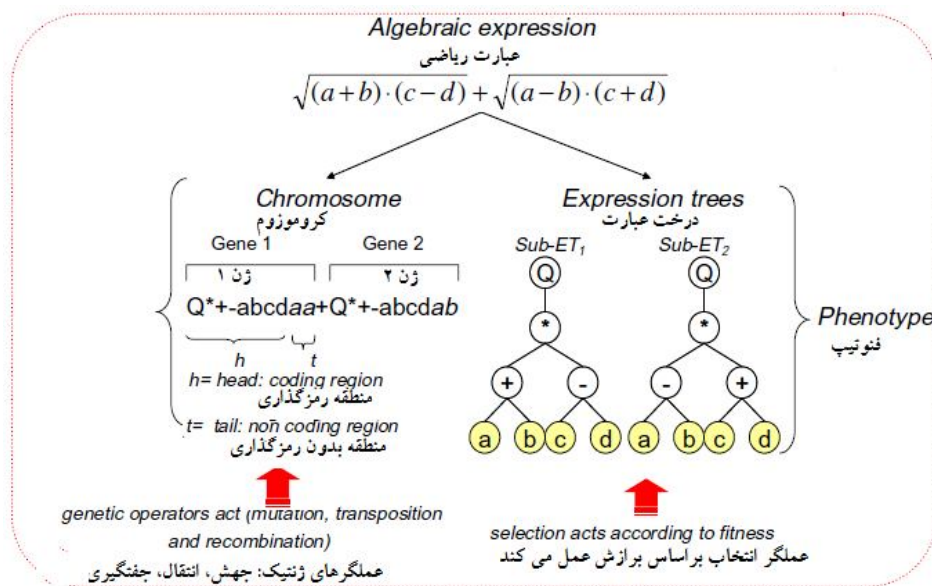
Table 2. Properties of experimental data used in GEP model development.

زمان time(hr)	قطر پیاز رطوبتی Wetting front radius d (m)	عمق پیاز رطوبتی Wetting front depth z (m)	حجم آب water Volume (m ³ .hr ⁻¹ .m ⁻¹)	K _s (m.s ⁻¹)	دبی q (L.hr ⁻¹)	محدوده Range
30	0.77	0.79	254.34	0.42	40	حداکثر Max.
0.17	0.16	0.09	2.50	0.00017	3.0	حداقل Min.
8.6	0.57	0.46	79.10	0.161	7.6	متوسط Avg.

اصلی سوم، اندازه سازگاری می‌باشد که روشی برای ارزیابی راه‌حل‌های برنامه داده شده در مورد یک مسأله خاص است. برگ‌ها و توابع، مؤلفه‌هایی از برنامه‌هایی هستند که اتصالات در درخت‌ها را تشکیل می‌دهند. انتخاب برگ‌ها، توابع و تابع سازگاری، فضای جستجوی GEP را تثبیت می‌کند. گام چهارم انتخاب پارامترهای خاص برای کنترل اجرا می‌باشد. پارامترهای کنترل شامل اندازه جمعیت، سرعت همگرایی و غیره می‌باشد. گام آخر تعیین معیار برای اتمام اجرا می‌باشد. زمانی که عملگرهای انتهایی و غیرانتهایی تعیین شدند، تولید برنامه اتوماتیک به وسیله فرآیند برگرفته از نظریه تکامل داروین، بعد از تولیدهای متوالی، اجرا شده و درخت جدید از اجزا تشکیل‌دهنده از طریق همگرایی، کپی و جهش تولید می‌شود. بر اساس انتخاب طبیعی، بهترین درخت‌ها شانس بیش‌تری برای این‌که قسمتی از تولید بعدی شوند، پیدا می‌کنند. در شکل ۲ ساختار کلی مدل‌سازی GEP در استخراج عبارت ریاضی معادل نشان داده شده است.

مدل‌سازی برنامه‌نویسی بیان ژن GEP: یکی از شاخه‌های پردازش تکاملی و الگوریتم‌های ژنتیک، برنامه‌نویسی بیان ژن است. در برنامه‌نویسی بیان ژن سعی می‌شود که با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک و مفاهیم درخت‌های تجزیه برای کاربردهای خاص، به جای این‌که کد برنامه لازم نوشته شود، به کامپیوتر این امکان داده شود که تنها با دانستن مفهوم کلی از کار، برنامه مورد نظر را آماده کند. در واقع یک دستور سطح بالا به کامپیوتر داده و کامپیوتر برنامه لازم برای اجرای برنامه مورد نظر را آماده می‌کند، سپس برنامه را اجرا تا خروجی مطلوب را ارائه دهد.

در این پژوهش برای حل مسائل با GEP، پنج گام اساسی زیر با کدنویسی در MATLAB 2015 اجرا شده است. گام اول تشخیص مجموعه‌های انتهایی برای استفاده در برنامه‌های کامپیوتری فردی می‌باشد. انواع اصلی مجموعه‌های انتهایی شامل متغیرهای غیروابسته مسأله، متغیرهای حالت سیستم و توابع بدون شناسه می‌باشند. گام اصلی دوم، تعیین مجموعه توابع 10^x , $\log(x)$, $\ln(x)$, $\cos(x)$, $\sin(x)$, x^a , \exp و غیره و عملگرهای هندسی (+, -, /, *) می‌باشد. گام



شکل ۲- ساختار کلی مدل‌سازی GEP برای عبارت ریاضی $\sqrt{(a+b).(c-d)} + \sqrt{(a-b).(c+d)}$.

Figure 2. General form of GEP for expression of $\sqrt{(a+b).(c-d)} + \sqrt{(a-b).(c+d)}$.

HFFUGEP است. summary.m: زیربرنامه برای نمایش گرافیکی خلاصه نتایج محاسبات، runtree.m: زیربرنامه نمایش خروجی‌های تولید شده توسط بهترین برنامه نمادین استخراج شده، gppretty.m: این زیربرنامه برای نمایش فرم صریح برنامه نمادین تولید شده همراه با فرم و مقادیر ضرایب بهینه شده آن است. gpmodel2mfile.m: زیربرنامه برای تولید خودکار برنامه MATLAB تابع نمادین تولید شده است. popbrowser.m: زیر برنامه برای نمایش گرافیکی همه برنامه‌ها و روابط استخراج شده است که تمامی روابط را از نظر دقت و پیچیدگی با یکدیگر مقایسه نموده و برنامه‌های بهینه تولید شده را ارائه می‌دهد. treegen.m: زیربرنامه تولید نسل جدیدی از عبارات برای درخت‌های تجزیه در مراحل مختلف تابع بایی ژنتیکی. Hpdivide.m، plog.m، psqroot.m square.m زیربرنامه‌های عملیات ریاضی نمادین می‌باشند. در این پژوهش برای ارزیابی کمی نتایج مدل بهینه پارتو از پارامترهای ضریب همبستگی (R^2) ، مجذور مربعات خطا (RMSE) و متوسط خطای نسبی (MAPE)^۳ استفاده شده است:

$$R = \frac{\left(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P}) \right)^2}{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \right] \left[\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}) \right]} \quad (10)$$

برای محاسبه RMSE از رابطه زیر استفاده شده است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \quad (11)$$

همچنین برای محاسبه MAPE از رابطه زیر استفاده شده است:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\left| \frac{O_i - P_i}{O_i} \right| \right) \times 100 \quad (12)$$

مدل تهیه‌شده، شروع به تولید ترکیب خطی/ غیرخطی وزن‌دار از زیربرنامه‌ها می‌نماید به طوری که در عبارت نهایی وزن‌های هر کدام از این زیربرنامه‌ها توسط کم‌ترین مربعات خطا تعیین می‌شوند. مدل تهیه‌شده از الگوی انتخاب مسابقه و تحلیل پارتو استفاده می‌کند. تابع هدف، حداقل‌سازی ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)^۱ است. عملگرها و توابع قابل استفاده در فرآیند استخراج روابط عبارتند از: جمع، تفریق، ضرب، تقسیم، جذر، لگاریتم طبیعی، توان دو، تانژانت هایپربولیک، سینوس، کسینوس، تابع نمائی، تابع توانی، تابع قدرمطلق، تابع جزء صحیح و با استفاده از قابلیت برنامه‌نویسی بیان ژن منطبق بر تحلیل بهینه‌سازی Pareto روابط نهایی را ارائه می‌دهند. همان‌گونه که بیان شد نتایج پژوهش حاضر در قالب یک کد نرم‌افزاری تحت عنوان HFFUGEP^۲ برای استخراج روابط هیدرولیکی مختلف ارائه شده است. در این قسمت ساختار کلی و جزئیات زیربرنامه‌های آن ارائه شده است. با توجه به این که HFFUGEP به صورت متن باز است و در MATLAB اجرا می‌شود بنابراین نیازی به نصب ندارد و از GUI آن نیز استفاده می‌کند. برخی از زیربرنامه‌های توسعه‌یافته به صورت زیر است: gpdemo2.m، gpdemo33.m، gpdemo4.m، gpdemo1.m: زیربرنامه اجرای مثال‌های ارزیابی و صحت‌سنجی، regressmulti_، fitfun.m: زیربرنامه مربوط به محاسبات تابع بایی رگرسیون چندگانه نمادین ژنتیکی. Myfunction_ config.m: از این زیربرنامه برای معرفی مشخصات و پارامترهای مورد نیاز انجام محاسبات نمادین ژنتیکی استفاده می‌شود و همچنین مجموعه داده‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها نیز در این مرحله معرفی می‌شوند. rungpm.m: زیربرنامه اصلی برای اجرای بسته

1- Root mean square error

2- Hydraulic function finding using gene expression programming

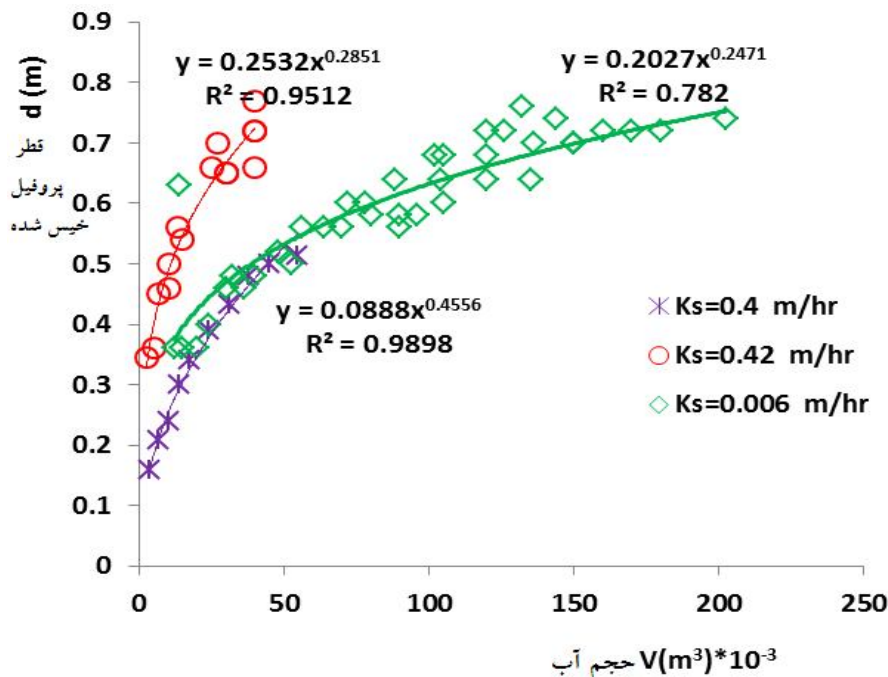
3- Mean absolute percent error

زمان با استفاده از مجموعه داده‌های گردآوری شده ارائه شده است. در شکل ۳ مشاهده می‌شود که با افزایش حجم آب نفوذی، قطر جبهه رطوبتی نیز افزایش می‌یابد. شدت تغییرات قطر جبهه رطوبتی در ابتدا و در حجم آب نفوذی کم، بیش‌تر و حساسیت آن نیز بیش‌تر است و با افزایش حجم آب نفوذی از شدت تغییرات قطر جبهه رطوبتی کم شده و در نهایت بسته به شرایط خاک، بافت و نفوذپذیری آن، قطر جبهه رطوبتی به مقدار مجانب خود می‌رسد. این وضعیت نشان می‌دهد که افزایش دبی قطره‌چکان‌ها تنها تا حد خاصی که تابع شرایط خاک و به‌خصوص بافت و نفوذپذیری آن است، منجر به افزایش گسترش عرضی جبهه رطوبتی و حرکت جانبی آب در خاک می‌شود و پس از افزایش دبی قطره‌چکان، افزایش محسوسی در قطر جبهه رطوبتی ایجاد نخواهد کرد.

که در آن‌ها، O_i مقدار مشاهداتی، P_i مقدار تخمینی، \bar{O} میانگین مقادیر مشاهداتی، \bar{P} میانگین مقادیر تخمینی و n تعداد داده‌های مورد استفاده می‌باشد. شاخص RMSE واحدی برابر با واحد متغیر مورد مطالعه دارد و معیاری برای سنجش خطای مقادیر خروجی مدل نسبت به مقادیر مشاهده می‌باشد. شاخص RMSE نشان‌دهنده توان دوم خطاهای ایجادشده می‌باشد، در نتیجه حساسیت بیش‌تری به نحوه پراکنش خطا دارد و خطاهای فاحش‌تر تأثیر بیش‌تری بر آن می‌گذارند. مقادیر بهینه این شاخص صفر است. شاخص MAPE میانگین خطای نسبی را نشان می‌دهد و مقدار بهینه آن صفر است.

نتایج و بحث

قطر خیس شده جبهه رطوبتی: در شکل‌های ۳ و ۴ تغییرات قطر خیس شده جبهه رطوبتی بر اساس پارامترهای هدایت هیدرولیکی، حجم آب نفوذی و

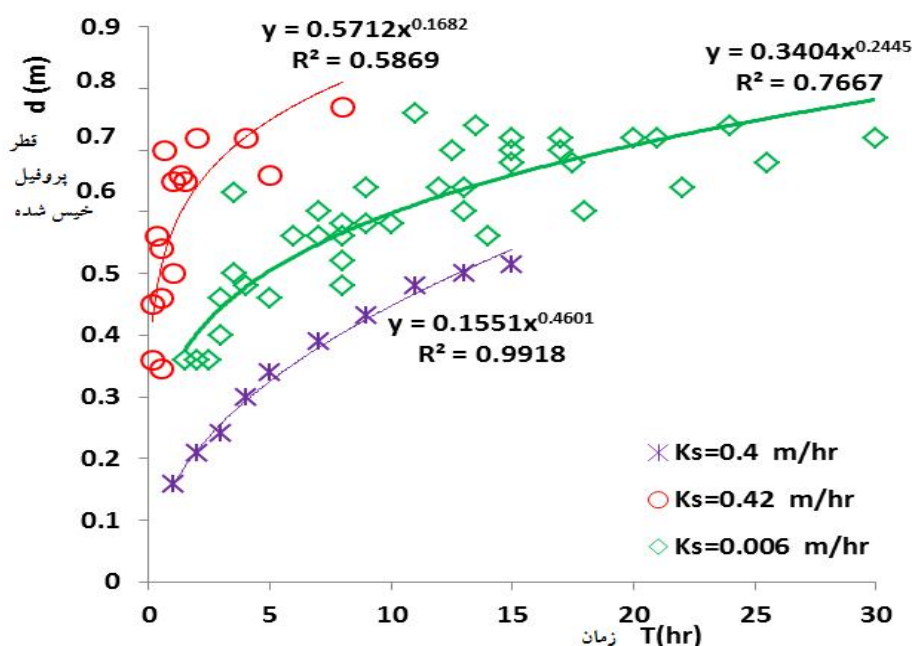


شکل ۳- تغییرات قطر جبهه رطوبتی با حجم آب نفوذی از قطره‌چکان‌ها.

Figure 3. Wetting front radius variations with volume of infiltrated water by emitters.

قطره‌چکان مجاور مماس بر یکدیگر شوند و یا این‌که همپوشانی مطلوبی بین جبهه رطوبتی دو قطره‌چکان مجاور ایجاد شود تا نوار خیس شده یکدستی در راستای طول لوله فرعی ایجاد گردد. میزان همپوشانی بهینه، تابع خصوصیات گیاه و سیستم کاشت است. طبق این شکل برای رسیدن به قطر مطلوب جبهه رطوبتی می‌توان مدت زمان کارکرد سیستم را نیز طراحی نمود و یا بالعکس در شرایطی که طراحی بر اساس زمان کارکرد سیستم انجام می‌تواند فواصل قطره‌چکان‌ها را به‌صورتی انتخاب نمود که با توجه به قطر جبهه رطوبتی همپوشانی مطلوب نوار خیس شده ایجاد گردد.

در شکل ۴، تغییرات قطر جبهه رطوبتی با زمان کارکرد قطره‌چکان‌ها ارائه شده است. در این شکل نیز مشابه شکل ۳، الگوی تغییرات قطر جبهه رطوبتی اطراف قطره‌چکان در ابتدا با سرعت بالایی انجام شده و با افزایش زمان کارکرد قطره‌چکان به‌علت غلبه جریان قائم بر مولفه افقی حرکت آب در خاک، تغییرات قطر جبهه رطوبتی محدود شده و به مقدار نهایی خود می‌رسد. طبق این نتایج مشاهده می‌شود که برای افزایش یکنواختی پروفیل رطوبتی خاک در راستای افقی، لازم است که فواصل قطره‌چکان‌ها با توجه به زمان آبیاری، دبی قطره‌چکان و حجم آب ورودی، حداکثر برابر با قطر جبهه رطوبتی باشد و به‌صورتی انتخاب شود که نیمرخ‌های رطوبتی دو



شکل ۴- تغییرات قطر جبهه رطوبتی با زمان کارکرد قطره‌چکان‌ها.

Figure 4. Wetting front radius variations with operation time of emitters.

حجم آب نفوذی و زمان کارکرد سیستم وجود دارد. با استفاده از این نمودارها می‌توان بر اساس حجم آب نفوذی به خاک یا زمان کارکرد سیستم، عمق نیمرخ خیس‌شدگی داخل خاک را تعیین کرد. سپس با

عمق خیس‌شده جبهه رطوبتی: در شکل‌های ۵ و ۶، تغییرات عمق جبهه رطوبتی با زمان و حجم آب آورده شده است. طبق این شکل‌ها، مشاهده می‌شود که رابطه غیرخطی افزایشی بین عمق جبهه رطوبتی با

آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی منطبق بر مدل شوارتزمن و زار با رویکرد برنامه‌نویسی بیان‌ژن ارائه شده است.

قطر پروفیل خیس‌شدگی به روش GEP: با استفاده از مجموعه داده‌های موجود اقدام به توسعه مدل GEP برای استخراج روابط جبهه رطوبتی گردید. در شکل ۷ روند همگرایی برنامه GEP نسبت به نسل‌های مختلف جهش و توسعه برنامه نمادین مربوطه در برآورد رابطه بدون بعد قطر پیاز خیس‌شدگی ارائه شده است. طی فرآیند یادگیری پس از این‌که برنامه به تکامل کامل رسید، متوقف شده و نتایج بهترین رابطه را به‌عنوان برنامه بهینه استفاده می‌نماید. نتایج برنامه بهینه در پیش‌بینی قطر پیاز رطوبتی در مراحل دوگانه توسعه ($RMSE=0/14$ و $R^2=0/99$) و ارزیابی ($RMSE=0/24$ و $R^2=0/96$) در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده است.

رابطه نهایی زیر بر اساس برنامه نمادین بهینه و با تحلیل پارتو برای تخمین قطر خیس شده نیمرخ رطوبتی به‌دست آمده است:

$$d^* = 2.033 (V^*)^{0.375} \quad (13)$$

عمق پروفیل خیس‌شدگی به روش GEP: مطابق روند فوق‌الذکر، برنامه GEP برای برآورد رابطه عمق بدون بعد نیمرخ خیس‌شدگی با متغیرهای مؤثر اجرا شد و نتایج مربوط به بهینه‌سازی رابطه بدون بعد عمق پیاز رطوبتی توسط برنامه‌نویسی بیان‌ژن در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ برای مراحل دوگانه توسعه و ارزیابی برنامه بهینه بر اساس تحلیل پارتو ارائه شده است. در نهایت رابطه بهینه تولید شده برای عمق پیاز رطوبتی بدون بعد مبتنی بر مدل شوارتزمن و زار به‌صورت زیر حاصل شده است که طبق معیارهای خطا در شکل‌های فوق از دقت مطلوبی برخوردار است.

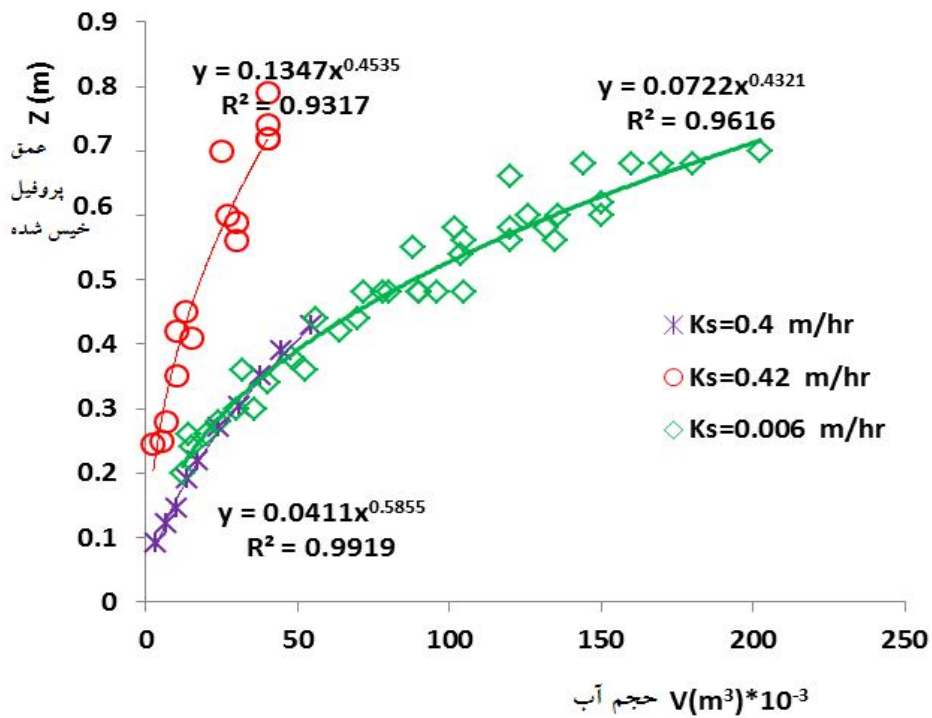
$$z^* = 1.374 (V^*)^{0.5} \quad (14)$$

مقایسه عمق نیمرخ رطوبتی با عمق توسعه ریشه گیاه، عمق نصب قطره‌چکان‌ها را به‌نحوی انتخاب نمود که نیمرخ رطوبتی داخل منطقه توسعه ریشه گیاه قرار گیرد و حداکثر توسعه و تراکم ریشه گیاه داخل نیمرخ رطوبتی قرار گیرد. این امر می‌تواند سبب افزایش بهره‌وری مصرف آب گردد ضمن این‌که در شرایط شوری آب و خاک نیز سبب تجمع نمک‌ها در حاشیه جبهه رطوبتی و دورتر از محدوده توسعه ریشه گیاه شود. در پژوهش انجام‌شده توسط سینگ و همکاران (۲۰۰۶) نیز مشاهده شد که با افزایش دبی قطره‌چکان‌ها، به‌علت افزایش حجم آب نفوذی، قطر و عمق نیمرخ خیس‌شده افزایش یافته است و از الگوی توانی در این مورد پیروی می‌کند (۲۰). همچنین روند تغییرات قطر و عمق نیمرخ رطوبتی با تغییرات دبی در هر دو سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی (DI) و آبیاری قطره زیرسطحی (SDI)^۲ کاملاً یکسان و مشابه بود و از این نظر تفاوت چندانی نداشتند. نتایج پژوهش حاضر نیز با نتایج به‌دست آمده از پژوهش سینگ و همکاران (۲۰۰۶) هماهنگ است.

همان‌گونه که در پژوهش حاضر و در شکل‌های ۴ و ۶ ملاحظه می‌شود، با افزایش زمان کارکرد سیستم، قطر و عمق نیمرخ خیس‌شدگی افزایش می‌یابد و در پژوهش سینگ و همکاران (۲۰۰۶) نیز روندی مشابه در سیستم‌های DI و SDI مشاهده شد. با این حال در پژوهش سینگ و همکاران (۲۰۰۶)، فقط مدت زمان کارکرد تا ۷ ساعت را مدنظر قرار داده است و برای زمان‌های بیش‌تر از ۷ ساعت، کم و بیش تخمینی بوده است (۲۷)، در حالی‌که در پژوهش حاضر داده‌ها تا مدت زمان ۳۰ ساعت را نیز دربردارند.

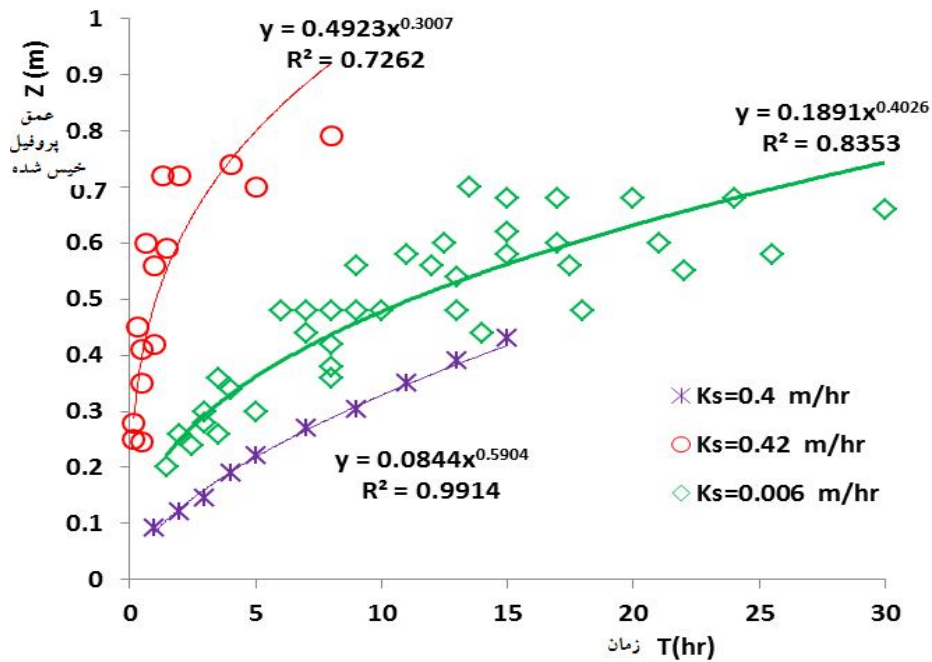
بهینه‌سازی روابط به روش GEP: در این قسمت نتایج استخراج و بهینه‌سازی روابط بدون بعد بیان‌کننده هندسه نیمرخ رطوبتی خاک در سامانه‌های

- 1- Drip irrigation
- 2- Subsurface drip irrigation



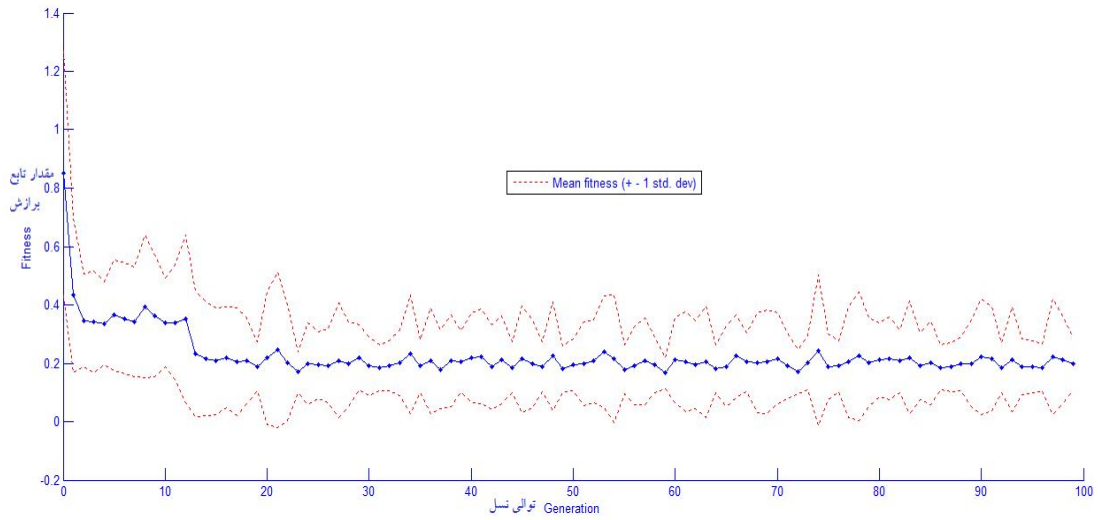
شکل ۵- تغییرات عمق جبهه رطوبتی با حجم آب نفوذی از قطره‌چکان‌ها.

Figure 5. Wetting front depth variations with volume of infiltrated water by emitters.



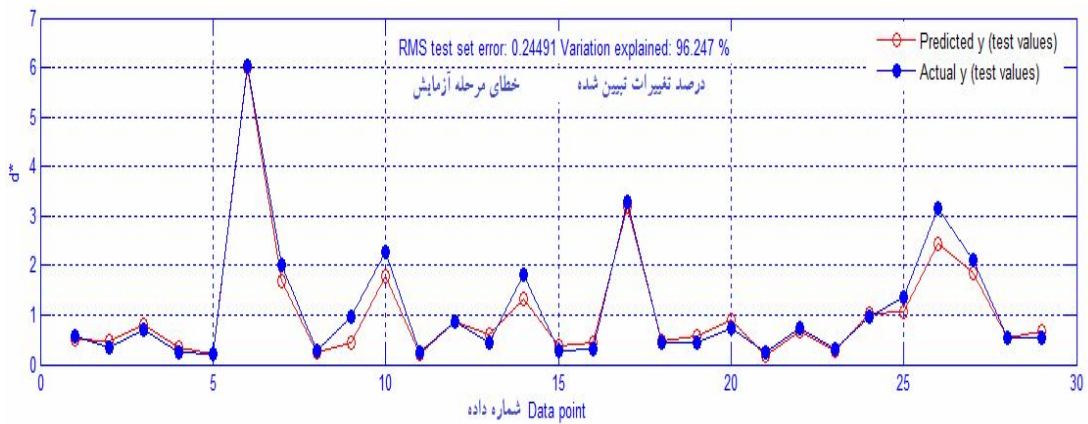
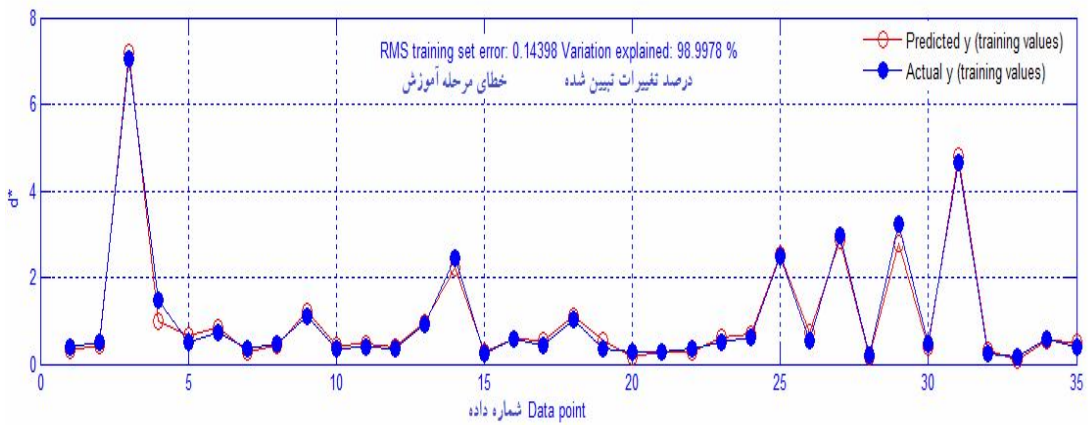
شکل ۶- تغییرات عمق جبهه رطوبتی با زمان کارکرد قطره‌چکان‌ها.

Figure 6. Wetting front depth variations with operation time of emitters.



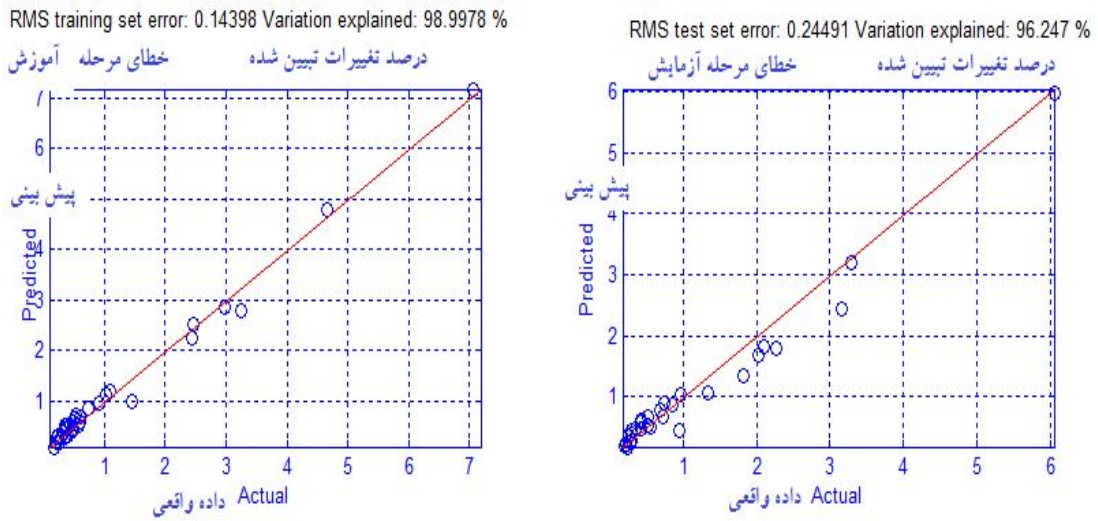
شکل ۷- روند همگرایی برنامه GEP در نسل‌های مختلف تولید برنامه بهینه قطر خیس‌شدگی.

Figure 7. Convergence trend of GEP in generations for optimum finding of wetting front radius.



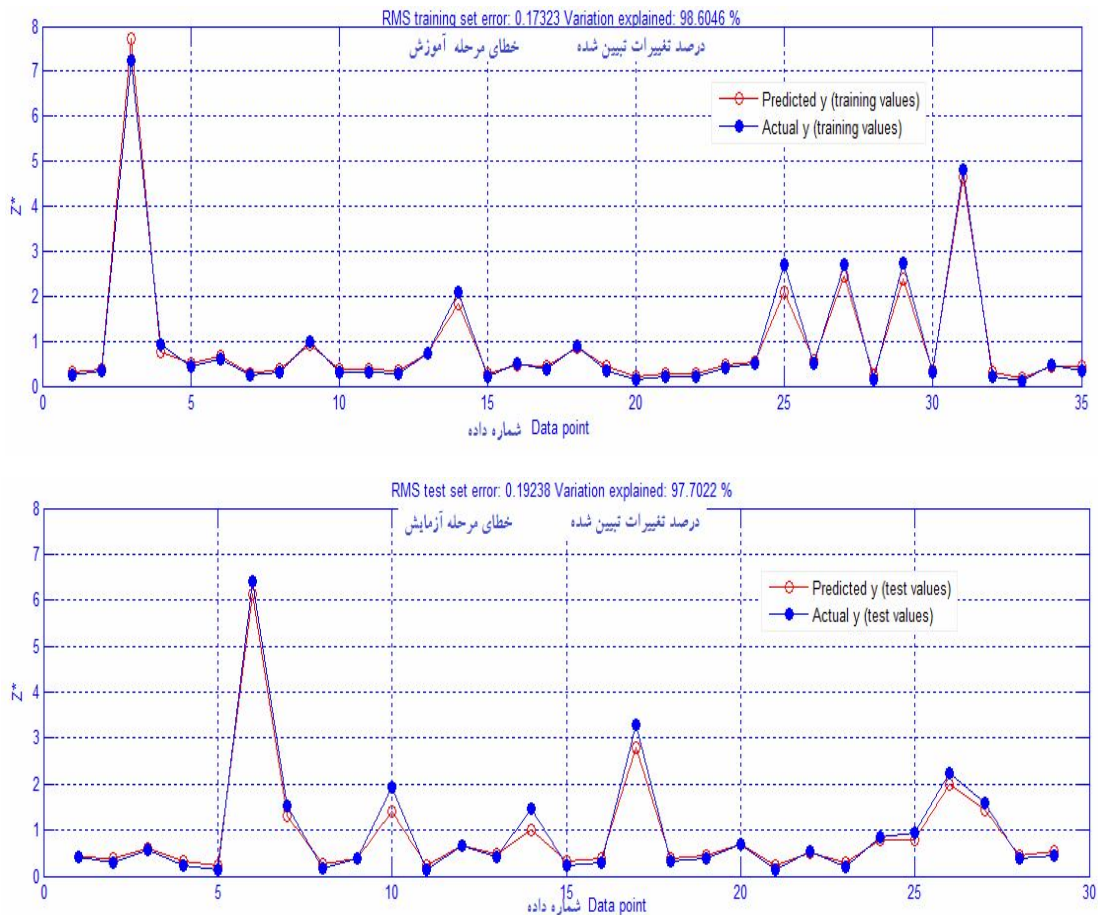
شکل ۸- مقایسه نتایج برنامه بهینه ژنتیکی در پیش‌بینی قطر پیاز رطوبتی در مراحل دوگانه توسعه و ارزیابی ژنتیکی.

Figure 8. Comparing GEP results with observed values of wetting front radius in training and testing stages.



شکل ۹- مقایسه نتایج GEP در مراحل توسعه و ارزیابی قطر جبهه رطوبتی.

Figure 9. Comparisons of GEP results correlations of wetting front radius in training and testing stages.



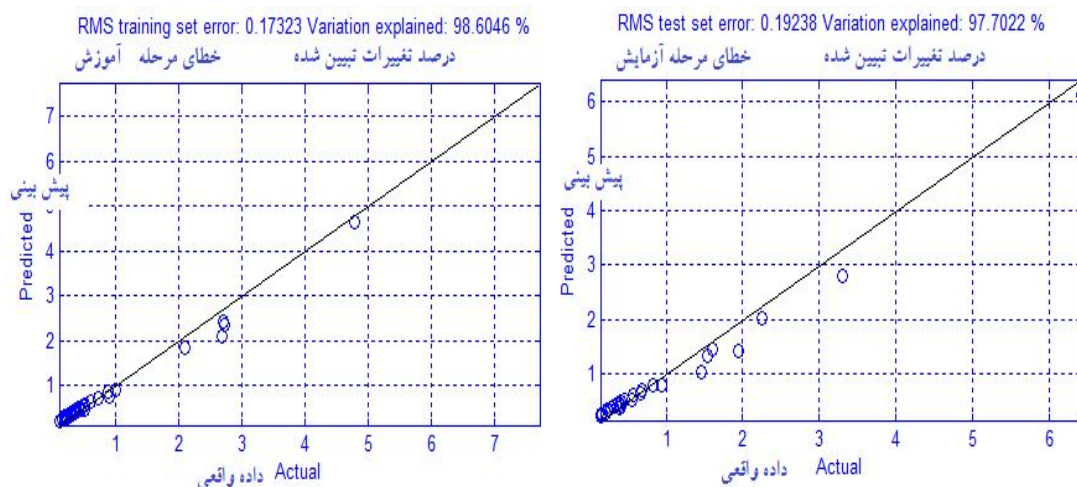
شکل ۱۰- مقایسه نتایج پیش‌بینی عمق پیزا رطوبتی GEP با داده‌های اندازه‌گیری شده در مراحل دوگانه توسعه و ارزیابی.

Figure 10. Comparing GEP results with observed values of wetting front depth in training and testing stages.

داده‌های خارج از محدوده برازش معادلات دقت مطلوبی نداشته و استفاده از آن‌ها در طراحی سیستم‌های آبیاری قطره‌ای همراه با خطا و عدم قطعیت است که منجر به عدم تامین یکنواختی پروفیل خیس‌شدگی و توزیع رطوبت غیریکنواخت در خاک خواهد شد و علاوه بر این محدوده اعتبار روابط حاصله بر اساس GEP نسبت به روابط قبلی موجود وسیع‌تر است و قابلیت‌های کاربردی و وسیع‌تری نیز دارد. طبق نتایج ارائه شده در جدول ۳ ملاحظه می‌شود که دقت معادلات بهینه‌یابی شده بر مبنای تکنیک GEP نسبت به روابط قبلی موجود، بهتر است و استفاده از آن‌ها در برآورد فواصل قطره‌چکان‌ها در سیستم آبیاری قطره‌ای کارآیی سیستم را افزایش خواهد داد. با توجه به این‌که معادلات ارائه شده تابعی از حجم آبیاری (زمان) هستند در هر زمان امکان برآورد قطر و عمق خیس‌شده خاک را دارند. در نتیجه می‌توان با توجه به مشخصات خاک مورد نظر، نوع قطره‌چکان متناسب با هر گیاه، مدت زمان آبیاری و کارکرد سیستم را تعیین نمود. همچنین با توجه به لزوم خیس‌شدن حجم مشخصی از خاک منطقه ریشه برای هر گیاه، مدت زمان آبیاری برای تامین نیاز آبی گیاه قابل برآورد است.

طبق نتایج ارائه شده ملاحظه می‌شود که معادلاتی که توسط برنامه‌نویسی بیان ژن GEP استخراج شده است در مراحل دوگانه توسعه و ارزیابی دقت مطلوبی در پیش‌بینی قطر و عمق خیس‌شده پیاز رطوبتی دارند. طبق معادلات تولید شده توسط برنامه‌نویسی بیان ژن مشاهده می‌شود که ابعاد پیاز رطوبتی به عواملی از قبیل دبی نوار آبیاری، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و زمان آبیاری بستگی دارد. با مشخص بودن این پارامترها، می‌توان ابعاد هندسی جبهه رطوبتی را محاسبه نموده و با اعمال ضریب مدیریت مناسب، طراحی مطلوب را انجام داده و فواصل قطره‌چکان‌ها روی خط فرعی آبیاری را محاسبه نمود.

مقایسه نتایج بهینه GEP با روابط موجود قبلی: در این قسمت مقایسه‌ای بین نتایج روابط بهینه‌سازی شده مبتنی بر GEP با نتایج روابط و معادلات پژوهشگران دیگر در این زمینه انجام شده است. در جدول ۳ مقادیر شاخص‌های R^2 ، MAPE و RMSE مربوط به معادلات ارائه شده در جدول ۱ آمده است. طبق این جدول ملاحظه می‌شود که استفاده از روابط تجربی پژوهشگران مختلف در تخمین ابعاد هندسی جبهه خیس‌شدگی در آبیاری قطره‌ای تحت فشار برای



شکل ۱۱- همبستگی نتایج پیش‌بینی عمق پیاز رطوبتی GEP با داده‌های اندازه‌گیری شده در مراحل دوگانه توسعه و ارزیابی.
Figure 11. Comparisons GEP model correlations of wetting front depth in training and testing stages.

جدول ۳- مقایسه نتایج روابط تجربی با نتایج GEP.

Table 3. Comparing empirical equation results with GEP model.

پارامترهای آماری Statistical Parameters			رابطه Eq.
MAPE	RMSE	R ²	
279.99	1.55	0.988	Z* سینگ و همکاران (۲۰۰۶)
77.97	1.541	0.97	D* Sing et al. (2006)
18.85	0.114	0.99	Z* شوارتزمن و زار (۱۹۸۷)
91.56	0.715	0.97	D* Schwartzman and Zur (1985)
19.33	0.114	0.99	Z* پلنگی و آخوندعلی (۲۰۱۱)
63	0.31	0.99	D* Schwartzman and Zur (1985)
32.01	2.91	0.95	Z* خلیلی و همکاران (۲۰۱۴)
216.29	8.24	0.93	D* Khalili et al. (2014)
29.5	0.16	0.99	Z* ناجلیک و همکاران (۲۰۱۴)
41.62	0.624	0.99	D* Naglič et al. (2014)
16.99	1.56	0.96	Z* میرزائی و همکاران (۲۰۰۵)
16.6	0.56	0.97	D* Mirzaei et al. (2005)
26.51	0.13	0.99	Z* پلنگی و آخوندعلی (۲۰۰۸)
61.8	0.3	0.99	D* Palangi and AkhondAli (2008)
12.05	0.27	0.99	Z* خان‌محمدی و بشارت (۲۰۱۳)
21.6	0.7	0.99	D* Khanmohamadi and Besharat (2013)
12	0.2	0.99	Z* برنامه‌نویسی بیان ژن
18.5	0.19	0.99	D* GEP

قطره‌چکان‌ها در سیستم آبیاری با توجه به نوع خاک و سیستم ریشه گیاه و بر اساس نتایج GEP ارائه شده است (۹). بدین‌منظور با اعمال روابط بدون بعد پارامترهای ۲ در معادلات بهینه GEP برای قطر پروفیل خیس‌شدگی رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$d = 2.033 (V)^{0.375} \left(\frac{Ks}{q} \right)^{0.0625} \quad (15)$$

و به همین صورت برای عمق جبهه رطوبتی رابطه ۱۶ ارائه می‌شود:

بر این اساس می‌توان بیان نمود که با داشتن روابط کاربردی با دقت بالا این امکان فراهم است تا طراحی، مدیریت و برنامه‌ریزی سیستم‌های آبیاری قطره‌ای را با قطعیت و اطمینان بیشتری انجام داده و راندمان این سیستم‌ها را در مسائل کاربردی به مقادیر تنوری نزدیک نمود.

طراحی آرایش قطره‌چکان‌ها با نتایج بهینه GEP: به‌منظور کاربردی نمودن نتایج پژوهش حاضر مشابه رویکرد کلر و همکاران (۱۹۹۰)، جداول طراحی کاربردی برای طراحی و انتخاب بهینه آرایش

توسعه ریشه ۷۰ سانتی متر فاصله مطلوب قطره چکان‌ها در خاک شنی ۰/۵ متر است و قطر نیمرخ خیس‌شدگی نیز ۰/۸ متر خواهد بود و تعداد قطره‌چکان‌ها در صد متر طول لاترال ۲۰۰ عدد خواهد بود.

نتیجه‌گیری کلی

بهره‌برداری و استفاده کامل از مزایا و نقاط قوت سیستم‌های آبیاری قطره‌ای، نیازمند بهینه‌سازی پارامترهای بهره‌برداری و طراحی سیستم است. در یک خاک معین، توسعه زمانی حجم خیس شده در تعیین فاصله مناسب بین قطره‌چکان‌ها و دور آبیاری به‌عنوان تابعی از حجم خاکی که ریشه‌های گیاه در آن قرار گرفته‌اند نقش دارد. در دسترس بودن روابط طراحی ساده که با استفاده از حداقل پارامترهای مورد نیاز به‌صورت آسان و کم‌هزینه، هندسه و ابعاد پیاز رطوبتی را در سیستم آبیاری قطره‌ای برآورد نمایند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به همین دلیل در این پژوهش با گردآوری پایگاه داده‌ها و اطلاعاتی پیرامون هندسه و ابعاد جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای، مدلی مبتنی بر برنامه‌نویسی بیان ژن توسعه‌یافته است که بهینه‌سازی فرم صریح و غیرخطی معادلات و روابط برآورد ابعاد پیاز رطوبتی در آبیاری قطره‌ای را انجام می‌دهد. طبق نتایج مشاهده شد که دقت نتایج بهینه‌سازی، مبتنی بر برنامه‌نویسی بیان ژن در تخمین حداکثر شعاع خیس‌شدگی و عمق خیس‌شدگی پیاز رطوبتی در مراحل دوگانه توسعه و ارزیابی بهتر است. علاوه بر این محدوده اعتبار معادلات ارائه شده در این پژوهش نیز وسیع‌تر از روابط تجربی قبلی است. به‌طوری‌که استفاده از جداول طراحی کاربردی برای آرایش قطره‌چکان‌های پیشنهادی این مقاله که هم ضرایب و هم فرم صریح و ریاضی آن‌ها توسط برنامه‌ریزی بیان ژن تعیین شده است می‌تواند عدم قطعیت و خطاها در طراحی سیستم آبیاری قطره‌ای را کاهش دهد.

$$z = 1.374 (V)^{0.5} \left(\frac{K_s}{q} \right)^{0.25} \quad (16)$$

با ترکیب رابطه‌های ۱۵ و ۱۶، رابطه طراحی زیر برای مشخصات خاک‌های مورد مطالعه به‌دست می‌آید:

$$d = 1.602 z^{0.75} \left(\frac{K_s}{q} \right)^{-0.125} \quad (17)$$

با استفاده از رابطه فوق می‌توان برای یک گیاه با عمق ریشه مشخص Z ، در خاکی با نفوذپذیری K_s ، فواصل قطره‌چکان‌های با دبی q را تعیین نمود. همچنین حجم آب مورد نیاز برای تامین عمق و قطر مطلوب نیمرخ خیس‌شدگی نیز بر اساس یکی از دو رابطه قبلی قابل محاسبه است. پس از محاسبه حجم آب مورد نیاز، با توجه به مقدار رطوبت موجود در خاک، حجم خالص آب آبیاری محاسبه شده و بر اساس دبی قطره‌چکان، مدت زمان کارکرد سیستم برای تامین حجم آب مورد نیاز تعیین می‌شود (جدول ۴). پس از مشخص شدن فواصل قطره‌چکان‌ها از رابطه فوق با توجه به طول لاترال‌ها، تعداد قطره‌چکان‌های مورد نیاز روی خط لاترال نیز تعیین شده و سپس دبی کل لاترال و قطر طراحی آن مشخص می‌شود. در گام بعدی هزینه کل قطره‌چکان‌های مورد نیاز و هزینه لوله لاترال با توجه به دبی مورد نیاز آن مشخص می‌شود.

بنابراین مشاهده می‌شود که تخمین و برآورد دقیق ابعاد پروفیل خیس‌شدگی در خاک به‌طور مستقیم بر هزینه‌های اجرای سیستم‌های آبیاری قطره‌ای تأثیر می‌گذارد. در جدول ۴ فواصل طراحی مناسب برای انواع قطره‌چکان‌های موجود در بازار با توجه به مشخصات نفوذپذیری خاک و عمق توسعه ریشه گیاه ارائه شده است که با استفاده از آن می‌توان مستقیماً فواصل مناسب قطره‌چکان‌ها و تعداد آن‌ها روی خط لاترال را برآورد نمود. مثلاً برای قطره‌چکان با دبی ۱ لیتر در ساعت و عمق

جدول ۴- آرایش بهینه قطره‌چکان‌های با آبدی متفاوت در عمق توسعه ریشه و در خاک‌های مختلف مبتنی بر نتایج GEP.

Table 4. Drip line spaces in different root depths, soil texture and drip discharges of GEP model.

دبی قطره‌چکان (لیتر در ساعت) Emitter Discharge (lit s ⁻¹)															
8			4			2			1			عمق Depth(cm)			
رسی Clay	سیلتی Silt	لومی Loam	شنی Sand	رسی Clay	سیلتی Silt	لومی Loam	شنی Sand	رسی Clay	سیلتی Silt	لومی Loam	شنی Sand	رسی Clay	سیلتی Silt	لومی Loam	شنی Sand
0.8	0.6	0.6	0.3	0.7	0.6	0.5	0.3	0.6	0.5	0.5	0.3	0.6	0.5	0.4	0.3
1.1	0.9	0.8	0.5	1	0.8	0.7	0.5	0.9	0.7	0.7	0.4	0.9	0.7	0.6	0.4
1.4	1.1	1	0.6	1.3	1	1	0.6	1.2	1	0.9	0.5	1.1	0.9	0.8	0.5
1.7	1.4	1.3	0.8	1.6	1.3	1.2	0.7	1.4	1.2	1.1	0.6	1.3	1.1	1	0.6
2	1.6	1.5	0.9	1.8	1.5	1.3	0.8	1.7	1.3	1.2	0.7	1.5	1.2	1.1	0.7
دبی قطره‌چکان (لیتر در ساعت) Emitter Discharge (lit s ⁻¹)															
50			30			20			12			عمق Depth(cm)			
رسی Clay	سیلتی Silt	لومی Loam	شنی Sand	رسی Clay	سیلتی Silt	لومی Loam	شنی Sand	رسی Clay	سیلتی Silt	لومی Loam	شنی Sand	رسی Clay	سیلتی Silt	لومی Loam	شنی Sand
0.9	0.8	0.7	0.4	0.9	0.7	0.6	0.4	0.8	0.7	0.6	0.4	0.8	0.6	0.6	0.4
1.4	1.1	1	0.6	1.3	1	1	0.6	1.2	1	0.9	0.6	1.2	0.9	0.8	0.5
1.8	1.4	1.3	0.8	1.7	1.3	1.2	0.7	1.6	1.3	1.2	0.7	1.5	1.2	1.1	0.7
2.2	1.7	1.6	1	2	1.6	1.5	0.9	1.9	1.5	1.4	0.9	1.8	1.4	1.3	0.8
2.5	2	1.8	1.1	2.3	1.9	1.7	1	2.2	1.8	1.6	1	2.1	1.7	1.5	0.9

منابع

1. Alizadeh, A. 2009. Irrigation System Design (Volume 2). Imam Reza University Press, Mashhad, Iran, 370p. (In Persian)
2. Bresler, E. 1978. Analysis of trickle irrigation with application to design problems. *Irrig. Sci.* 1: 1. 3-17.
3. Cook, F.J., Thorburn, P.J., Fitch, P., and Bristow, K.L. 2003. Wet Up: a software tool to display approximate wetting patterns from drippers. *Irrig. Sci.* 22: 3-4. 129-134.
4. Ghorbanianm, M., Ebrahimian, E., and Merit, A. 2014. Evaluation models HYDRUS-2D and SEEP/W in estimation of wetting surface and subsurface drip irrigation gravity. *Iran. J. Water Soil.* 28: 1. 179-189.
5. Hasanli, A. 1990. Check drip irrigation systems and solutions to improve the management and increase productivity. 10th National IRNCID Congress Proceedings, Tehran. 1-6 August. (In Persian)
6. Jahanshahi, M., Zareabyaneh, H., Naghavi, H., and Eslami, A. 2013. Assessment of influence of iInstallation depth of emitter with same discharges on moisture distribution in subsurface drip irrigation system and simulation with HYDRUS-2D Model. *Iran. J. Irrig. Water Eng.* 3: 10. 101-113.
7. Kandelous, M.M., Šimunek, J., van Genuchten, M.T.h., and Malek, K. 2011. Soil water content distributions between two emitters of a subsurface drip irrigation system. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 75: 2. 488-497.
8. Karimi, B., Sohrabi, T., Mirzaei, F., and Babae, B. 2014. Developing equations to predict the Pattern of soils moisture redistribution in surface and subsurface drip irrigation systems using dimension analysis. *J. Water Soil Cons.* 21: 6. 223-237.
9. Keller, J., and Bliesner, R.D. 1990. Sprinkler and trickle irrigation. Van Nostrand Reinhold, New York, NY, USA. 652p.
10. Khanmohamadi, N., and Besharat, S. 2013. Simulating wetting front in drip irrigation using HYDRUS-2D. *J. Water Soil Cons.* 2: 4. 15-27.
11. Khalili, M., Akbari, M., Hezarjaribi, A., Zakerinia, M., and Abbasi, F. 2014. Numerical versus empirical models for estimating wetting patterns in subsurface drip irrigation systems. *J. Agri. Eng. Res.* 15: 2. 1-14.
12. Malek, K., and Peters, R.T. 2010. Wetting pattern models for drip irrigation: new empirical model. *J. Irrig. Drain. Eng.* 137: 8. 530-536.
13. Mirzaei, F., Liaghat, A.M., Sohrabi, T.M., and Omid, M. 2005. Simulation of the wetting front from a linear source in tape irrigation systems. *J. Agri. Eng. Res.* 6: 23. 53-66.
14. Moncef, H., Hedi, D., Jelloul, B., and Mohamed, M. 2009. Approach for predicting the wetting front depth beneath a surface point source: Theory and numerical aspect. *Irrig. Drain. Eng.* 51: 347-360.
15. Naglic, B., Kechavarzi, C., Coulon, F., and Pintar, M. 2014. Numerical investigation of the influence of texture, surface drip emitter discharge rate and initial soil moisture condition on wetting pattern size. *Irrig. Sci.* 32: 6. 421-436.
16. Palangi, A.J., and Akhondali, A. 2008. A Semi-empirical model for estimating the geometry of the wetting front under point source trickle irrigation. *J. Sci. Tech. Agri. Nat. Res. Water Soil Sci.* 12: 44. 85-96. (In Persian)
17. Palangi, J.A., and Akhondali, A. 2011. Evaluation schwartzman and force model to determine the distance in drip irrigation emitters (Case study: Albaji region, Khuzestan Province). *J. Irrig. Drain.* 5: 2. 202-208. (In Persian)
18. Riahi, H., Samani, J.M.V., and Khashaei, A. 2007. Evaluating the ability of the SEEP/W model in simulation of water through drip irrigation and moisture measurement, 9th Seminar on irrigation and evaporation reduction, Kerman, April 5-7. (In Persian)
19. Schwartzman, M., and Zur, B. 1985. Emitter Spacing and Geometry of Wetted Soil Volume. *J. Irrig. Drain. Eng.* 112: 3. 242-253.

20. Singh, D.K., Rajput, T.B.S., Sikarwar, H.S., Sahoo, R.N., and Ahmadi, T. 2006. Simulation of soil wetting pattern with subsurface drip irrigation from line source. *Agric. Water Manage.* 83: 1. 130-134.
21. Siyal, A.A., and Skaggs, T.H. 2009. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation. *Agric. Water Manage.* 96: 6. 893-904.
22. Skaggs, T.H., Trout, T.J., Simuenk, J., and Shouse, P.J. 2004. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. *J. Irrig. Drain. Eng.* 130: 4. 304-310.
23. Subbaiah, R. 2013. A review of models for predicting soil water dynamics during trickle irrigation. *Irrig. Sci.* 31: 3. 225-258.
24. Subbauah, R., and Mashru, H.H. 2013. Modeling for predicting soil wetting radius under point source surface trickle irrigation. *Agric. Eng. Int.: CIGR J.* 15: 3. 1-10.
25. Tamjid, M., Bigloi M.H., Khaledian, M.R., Moridnezhad, A., and Mohammadi, A. 2014. Comparison of linear regression and neural networks to estimate the size of wetting on slopes. *Knowledge of Soil and Water.* 24: 4. 237-246.
26. Yao, W., Xiao, Yi, M., Juan, L., and Parkes, M. 2010. Simulation of point source wetting pattern of subsurface drip irrigation. *Irrig. Sci.* 29: 4. 331-339.
27. Zhang, R., Cheng, Z., Zhang, J., and Ji, X. 2012. Sandy loam soil wetting patterns of drip irrigation: a comparison of point and line sources. *Procedia Engineering*, 28: 506-511.



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 23(5), 2017
<http://jwsc.gau.ac.ir>

Performance Evaluation of Gene Expression Programming Approach in Layout Design of Drippers in Drip Irrigation systems comparing with empirical method

***H. Riahi-Madvar¹ and A. Seifi¹**

¹Assistant Prof., Dept. of Water Science and Engineering, Vali-e-Asr University, Rafsanjan
Received: 07/08/2015; Accepted: 06/29/2016

Abstract

Background and Objectives: One of the essential aspects of design and management of drip irrigation system is soil moisture movement pattern and its dimensions in vertical and horizontal directions. Accurate estimation of soil water distribution in drip irrigation and subsurface drip irrigation is vital, because of its effects on design parameter as: emitters' layout, lateral spaces, plant root grow, efficiency application of water, salt distribution around the dripper and has evident effects on successfulness of drip irrigation systems. So deriving design equations between soil texture, emitter discharge, water volume infiltrated in soil, soil wetted volume and irrigation time for prediction of wetting bulb dimensions have major application values. One of these are empirical design equations, which derived based on dimensional analysis and experimental data. The other researchers have developed several empirical equations based on experimental data where need soil condition calibrations. The main objective of this study is to apply genetic expression programming for automatic function finding in DI and SDI wetting front dimensions and prepare design tables in different soil and dripper conditions.

Materials and Methods: In this study GEP approach is used for automatic function finding of dimensionless soil water distribution equations using available extended data. GEP programming is done in MATLAB. The GEP code use operator and functions of: plus, minus, times, divide square, power, tanh, sin, cos, exp, abs, if-then and derive predictor equations based on GEP automatically. This paper presents design equations based on volume water, irrigation time and emitter discharge and soil hydraulic conductivity. The results of derived equations are compared with observations graphically and by R^2 , RMSE and MAPE indices. The final form of optimum equations derived based on pareto analysis over generations. Finally design tables for different soil, root depth and emitter discharges are presented.

Results: GEP results are compared with those of 8 empirical equations using graphical and statistical indices of R^2 , RMSE and MAPE. Based on the results it is cleared that the GEP model with RMSE=0.2, MAPE=12%, $R^2=0.99$ values for depth and RMSE=0.19, MAPE=18.5%, $R^2=0.99$ values for wetting front diameter have better results the others and is superior for applying in different and extensive design conditions. The Schwartzman and Zur (1985) empirical model have RMSE=0.12, MAPE=18.5%, $R^2=0.99$ values for depth and RMSE=0.72, MAPE=97%, $R^2=0.97$ values for wetting front diameter has some errors. Also design tables based on optimum GEP results based on conventional condition of Iran soil and emitters are developed.

Conclusion: Based on the results GEP equations have extensive validation ranges (discharge ranges 1 to 5 l/s, depth up to 110 cm) than other empirical equations and involves different conditions of emitter and soil and based on the results comparisons using GEP equations will reduce uncertainties in design of drip irrigation systems and will improve water use efficiency and performances of these systems.

Keywords: Drip irrigation, Design tables, Drippers layout, Gene expression programming, Soil water distribution patterns

* Corresponding Author; Email: h.riahi@vru.ac.ir

