دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز

"مقاله پژوهشی"

برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به روش برنامه‌ریزی بیان ژن و مقایسه آن با توابع انتقالی

مهنوش فرزادمهر[۱]، مهدی دستورانی[۲]، عباس خاشعی سیوکی[۳] و وحیدرضا جلالی موخر[۴]

۱ و ۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد و استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند
۲- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، (نویسنده مسوول: mdastourani@birjand.ac.ir)
۴- دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، مجتمع آموزش عالی شیروان
تاریخ دریافت: ۹۸/۶/۳۰ تاریخ پذیرش: ۹۹/۱/۹
صفحه: ۱۵۵ تا ۱۶۴

چکیده

هدایت هیدرولیکی اشباع خاک یک ویژگی مهم فیزیکی خاک است که بر حرکت آب در خاک موثر است. از آنجاییکه اندازه‌گیری این ویژگی به روش‌های مستقیم مزرعه‌ای و آزمایشگاهی دشوار، زمانبر و هزینه‌بر است، از روش‌های غیرمستقیم استفاده می‌شود.هدف از این پژوهش برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک از روی خصوصیات زودیافت خاک به کمک روش برنامه‌ریزی بیان ژن، تعدادی از توابع انتقالی و مدل روزتا و مقایسه آن‌ها با یکدیگر است. در این پژوهش از مجموعه داده‌ای با اطلاعات خاک‌شناسی ۱۵۱ نمونه خاک که از منطقه‌ای در بجنورد گردآوری شده بود استفاده شد. ویژگی‌های خاک شامل درصد شن، سیلت، رس، درصد کربن آلی، درصد مواد خنثی‌شونده، هدایت الکتریکی، رطوبت اشباع، اسیدیته، جرم مخصوص ظاهری و جرم مخصوص حقیقی خاک بود. با استفاده از این ویژگی‌ها به عنوان پارامترهای ورودی به مدل برنامه‌ریزی بیان ژن، فرآیند مدل‌سازی انجام شد. برنامه‌ریزی بیان ژن از میان این ویژگی‌ها، تنها از چهار پارامتر درصد شن، سیلت، وزن مخصوص ظاهری و وزن مخصوص حقیقی در تابع ایجاد شده برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع استفاده کرد. این مدل با ریشه خطای میانگین مربعات (RMSE) برابر با ۲/۸۴ سانتیمتر بر روز و R^2 برابر با ۰/۹۱ بهترین عملکرد را در مقایسه با سایر توابع انتقالی نشان داد. پس از برنامه‌ریزی بیان ژن، تابع انتقالی جبرو (۱۹۹۲) با جذر میانگین مربعات خطای برابر با ٤/٧٤ سانتیمتر بر روز و مقدار R^2 برابر ۰/۸۲ بهترین تابع انتقالی میان سایر توابع انتقالی و روزتا بود. مدل ساکستون و همکاران (۱۹۸٦) کمترین دقت برآورد هدایت هیدورلیکی اشباع را در میان روش‌های استفاده شده داشت. به دلیل تفاوت داده‌های استفاده شده برای ایجاد هر یک از توابع انتقالی و تغییرات مکانی بالای هدایت هیدرولیکی اشباع، میان روش‌های مختلف مورد استفاده تفاوت زیادی از نظر خطای RMSE، MAE و MBE بود. برای داده‌های مورد استفاده در این پژوهش برنامه‌ریزی بیان ژن عملکرد بهتری داشت و تعیین ساختار مدل و پارامترهای موثر برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع توسط برنامه، از مزایای آن است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژن، الگوریتم تکاملی، توابع انتقالی، روش‌های غیرمستقیم، مدل روزتا

مقدمه

هدایت هیدرولیکی اشباع خاک که نشان‌دهنده توانایی خاک در انتقال آب در شرایط اشباع است یکی از خصوصیات مهم فیزیکی خاک است و بر حرکت آب و املاح در خاک تاثیر دارد. این ویژگی بر نفوذ آب در خاک و ایجاد رواناب سطحی موثر است. در پروژه‌های زهکشی برای تعیین فاصله و عمق زهکش‌ها، در عملیات آبیاری، فاصله قطره‌چکان‌ها در آبیاری قطره‌ای (۱۲)، تغذیه آب‌های زیرزمینی، شبیه‌سازی آبشویی، شبیه‌سازی حرکت آب و انتقال املاح نیاز به هدایت هیدرولیکی اشباع خاک است (۱۰). همچنین برای مطالعه جریان آب در سدهای خاکی، تعیین ظرفیت ذخیره مخازن آب و بهره‌برداری از آنها دارای اهمیت می‌باشد (۵). اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع به روش‌های مستقیم مزرعه‌ای و آزمایشگاهی معمولا زمانبر است و با دشواری و هزینه بالا همراه است. از معایب روش‌های آزمایشگاهی این است که به دستگاه و وسائل مخصوص نیاز است و انجام آزمایشات به زمان نیاز دارد (۳)، همچنین ممکن است که نشان‌دهنده شرایط واقعی مزرعه نباشند (۲۱). برای استفاده از روش‌های مزرعه‌ای تغییرات مکانی هدایت هیدرولیکی اشباع و در نتیجه نیاز به برداشت نمونه‌هایی با اندازه یا حجم بالا منجر به افزایش هزینه‌های کارگری شده (۱۵) و یا پدیده حبس هوا در منافذ خاک هنگام اشباع شدن نمونه خاک، نوع روش مورد استفاده و اندازه نمونه خاک از جمله مسائلی است که سبب تفاوت نتایج به دست آمده می‌شود. بنابراین محققان مختلفی از روش‌های غیرمستقیم به عنوان راهکاری جایگزین در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع استفاده کردند. در روش‌های غیرمستقیم مانند توابع انتقالی[1]، خصوصیات دیریافت خاک از جمله هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، با استفاده از خصوصیات زودیافت آن تخمین زده می‌شود. توابع انتقالی از معادلات رگرسیونی خطی یا غیرخطی و یا شبکه عصبی مصنوعی برای برآورد خصوصیات دیریافت خاک از روی خصوصیات زودیافت آن استفاده می‌کنند و به این صورت با صرف وقت و هزینه کمتر و دقت قابل قبول می‌توان خصوصیات دیریافت خاک را برآورد کرد (۱). تاکنون توابع انتقالی رگرسیونی مختلف ایجاد شده که از پارامترهای درصد رس (۲۰)، درصد شن و رس (۴) و یا توزیع اندازه ذرات به همراه وزن مخصوص ظاهری و درصد مواد آلی (۲۸ و ۲۹) برای پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع استفاده شده است. پژوهش‌هایی نیز در زمینه مقایسه توابع انتقالی مختلف، توسط پژوهشگران صورت گرفته است که یکی از آنها توسط تیتج و هنینگز (۲۶)، انجام گرفته است

1- Pedotransfer functions

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.22.23.9]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.22.155]

که توابع انتقالی رگرسیونی و توابع تجربی- فیزیکی را در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع در ۱۱ بافت خاک مقایسه کردند. طبق نتایج پژوهش ایشان، توابع انتقالی بهترین عملکرد را در خاک‌های شن لومی داشتند و در پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع برای خاک با بافت رسی، به دلیل رفتار رس‌ها، دقت توابع انتقالی کاهش یافت. میناسنی و مک‌براتنی (۱۶) نیز با مقایسه توابع انتقالی مختلفی، نشان دادند که توابع انتقالی برای خاک‌های شنی و لومی در مقایسه با خاک‌های با بافت رسی، عملکرد بهتری داشتند.

استفاده از روش‌های رگرسیونی برای ایجاد توابع انتقالی نیاز به تعیین پارامترهای موثر در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع و نیز تعیین نوع معادله رگرسیونی می‌باشد، بنابراین استفاده از روش‌های داده‌کاوی برای ایجاد توابع انتقالی و یا پیش‌بینی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک گسترش یافته‌اند (۱۹). شبکه‌های عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی خصوصیات هیدرولیکی خاک به طور گسترده‌ای استفاده شده است و در برآورد هدایت هیدورلیکی اشباع عملکرد بهتری نسبت به توابع انتقالی نشان داده است (۲۳).

پاراسورامان و همکاران (۱۸) از برنامه‌ریزی ژنتیک[1] (GP) که روشی مبتنی بر داده و از الگوریتم‌های تکاملی است، برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع استفاده کردند و آن را با شبکه‌های عصبی مقایسه کردند و یکی از برتری‌های برنامه‌ریزی ژنتیک بر شبکه عصبی را در توانایی آن در تکامل مدل، از نظر تعداد پارامترها و نیز ساختار مدل، در طول فرآیند پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع ذکر کردند، درحالیکه در شبکه عصبی مصنوعی، ساختار مدل و مهمترین پارامترها باید پیش از مدل‌سازی مشخص شوند. یکی دیگر از روش‌های ایجاد توابع انتقالی، برنامه‌ریزی بیان ژن[2] می‌باشد که توسط فریرا در سال ۱۹۹۹ ایجاد شد (۷). این روش به خانواده الگوریتم‌های تکاملی تعلق دارد و توسعه‌ای از الگوریتم ژنتیک[3] (GA) و برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) است (۷). روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) روشی ساده‌تر در مقایسه با روش‌های بیان ژن مشابه است و تنها از کروموزوم‌ها و درخت‌های بیانی بهره می‌برد. در واقع ویژگی ممتاز این روش در اختراع کروموزوم‌هایی است که قادر به ارائه درخت بیانی هستند (۷). از مزایای برنامه‌ریزی بیان ژن در آن است که تمامی روابط خطی و غیرخطی محتمل موجود در داده‌ها را بررسی کرده و درنهایت مناسب‌ترین آن‌ها را به عنوان خروجی ارائه می‌کند (۲). انتخاب مهمترین پارامترها از بین پارامترهای موثر بر پدیده مورد نظر توسط خود برنامه و سهولت استفاده از آن، از دیگر مزایای این روش است (۱۸ و ۹). از برنامه‌ریزی بیان ژن در پیش‌بینی تبخیر تعرق مرجع روزانه (۲۵) و تابش ورودی خورشیدی روزانه (۱۴)، استفاده شده است. در زمینه مطالعات روابط آب و خاک، یاسین و همکاران (۳۰) حجم آب نفوذ یافته در آبیاری به روش فارو را به کمک روش‌های برنامه‌ریزی بیان ژن و دو نقطه‌ای پیش‌بینی کردند و نشان دادند که روش برنامه‌ریزی بیان ژن برآورد دقیق‌تری نسبت به روش دو نقطه‌ای داشته است. احمدی و همکاران (۲) از برنامه‌ریزی بیان ژن برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع استفاده کردند و آن را با روش رگرسیون ریج مقایسه کردند. آنها از ۶ الگوی مختلف از پارامترهای ورودی شامل وزن مخصوص ظاهری، شن، سیلت، رس، ماده آلی، هدایت الکتریکی و اسیدیته استفاده کردند و نشان دادند که مدل برنامه‌ریزی بیان ژن با ورودی‌های رس و وزن مخصوص ظاهری، خطای RMSE و MAE کمتر و R^2 بالاتری نسبت به مدل رگرسیون ریج داشت. هدف از این پژوهش، برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک از روی خصوصیات زودیافت خاک به کمک روش برنامه‌ریزی بیان ژن و مقایسه تابع انتقالی ایجاد شده توسط آن در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع، با تعدادی از توابع انتقالی شناخته شده و مدل روزتا است.

مواد و روش‌ها

تجزیه و تحلیل داده‌ها

در این پژوهش از مجموعه داده‌ای شامل اطلاعات خاکشناسی ۱۵۱ نمونه خاک استفاده شد. این مجموعه داده از منطقه دشت دامنه‌ای قره‌میدان واقع در ۷۰ کیلومتری شمال غرب بجنورد با مختصات جغرافیایی ۴۸°۳۷' E ۱۳°۵۷N' تهیه شده بود (۱۱). تعدادی از خصوصیات زودیافت خاک به عنوان متغیرهای پیش‌بینی کننده برای تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع استفاده شد. این متغیرها شامل درصد شن، سیلت، رس، درصد کربن آلی، مواد خنثی شونده، هدایت الکتریکی، اسیدیته، رطوبت اشباع، جرم مخصوص ظاهری و جرم مخصوص حقیقی خاک بودند. هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از دستگاه نفوذسنج گلف اندازه‌گیری شد، جرم ویژه ظاهری به روش کلوخه، جرم ویژه حقیقی از طریق پیکنومتر و فراوانی نسبی اندازه ذرات به روش هیدرومتری تعیین شد (به نقل از ۱۱). خلاصه خصوصیات آماری متغیرهای مورد استفاده در جدول ۱ آمده است.

1- Genetic programming 2- Gene Expression Programming 3- Genetic algorithm

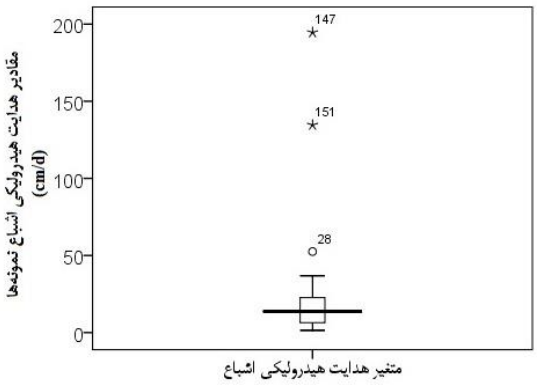
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.22.23.9]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.22.155]

جدول ۱- خصوصیات آماری خاک مورد مطالعه (۱۱)

Table 1. Statistical properties of the studied soil

ویژگی	واحد	دامنه	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات (درصد)
شن	گرم بر گرم	۰/۶۶۳	۰/۰۳۷	۰/۷	۰/۲۱	۰/۰۸۲	۳۸/۹۹
سیلت	گرم بر گرم	۰/۴۳۶	۰/۱۸۴	۰/۶۲	۰/۴۸۶	۰/۰۵۳	۱۰/۷۷
رس	گرم بر گرم	۰/۳۲	۰/۱۱۶	۰/۴۳۶	۰/۳۰۳	۰/۰۴۶	۱۵/۰۴
کربن آلی	درصد	۱/۷	۰/۲۱	۱/۹۱	۰/۸۹	۰/۲۲۱	۲۴/۹۱
مواد خنثی شونده	درصد	۳۶/۷۵	۱۱	۴۷/۷۵	۲۲/۱۷	۵/۱۶	۲۳/۲۷
هدایت الکتریکی	دسی‌زیمنس بر متر	۳/۵۴	۰/۲۷	۳/۸۱	۱/۷۴	۰/۴۸۹	۲۸/۰۳
اسیدیته	لگاریتم عکس یون H^+	۱/۸۹	۶/۴۴	۸/۳۳	۷/۳۶	۰/۲۹۶	۴/۰۲
رطوبت اشباع	مترمکعب بر مترمکعب	۱۳	۴۳	۵۶	۵۰/۵	۲/۴۳۶	۴/۸۲
جرم مخصوص حقیقی	گرم بر سانتی‌متر مکعب	۰/۳۸	۲/۴۰	۲/۷۸	۲/۵۶	۰/۰۸۱	۳/۱۴
جرم مخصوص ظاهری	گرم بر سانتی‌متر مکعب	۰/۳۷	۱/۳۸	۱/۷۵	۱/۵۴	۰/۰۸۱	۵/۲۵
هدایت هیدرولیکی اشباع	سانتی‌متر بر روز	۵۱/۱۱	۱/۳۹	۵۲/۵۱	۱۵/۱۴	۹/۴۶	۶۲/۴۷

نمودار جعبه‌ای توزیع هدایت هیدرولیکی اشباع نمونه‌های خاک برای کمک به تشخیص داده‌های پرت تک متغیره رسم شد، که در شکل ۱ آمده است. دو نمونه ۱۴۷ و ۱۵۱ که بیشترین هدایت هیدرولیکی اشباع را به ترتیب برابر ۱۳۴/۶ و ۱۹۴/۶۲ سانتی‌متر بر روز داشتند به عنوان داده‌های پرت حدی شناخته شده‌اند (علامت ستاره در شکل ۱) و نمونه شماره ۲۸ به عنوان داده پرت شناخته شد (علامت دایره در شکل ۱). داده پرت داده‌ای است که مقداری ۱/۵ برابر تفاوت چارک اول و سوم مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع دارد و داده پرت حدی مقداری سه برابر تفاوت چارک اول و سوم داده‌ها دارد (۱۷). هدایت هیدرولیکی اشباع دامنه گسترده‌ای از نظر تغییرات دارد و مقدار آن بسته به نوع خاک از چند میلی‌متر در روز تا چند متر در روز متغیر است. مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع برای هر سه نمونه ذکر شده در نمودار شکل ۱ مقادیری طبیعی و در همین طیف هستند اما با سایر نمونه‌ها تفاوت زیادی دارند. برای افزایش دقت مدل‌ها و دست‌یابی به نتایج بهتر، دو داده پرت حدی حذف شدند (۱۷).



شکل۱- نمودار جعبه‌ای توزیع هدایت هیدرولیکی اشباع نمونه‌های خاک (سانتیمتر بر روز)

Figure 1. Box plot of saturated hydraulic conductivity distribution of the soil samples (ks= saturated hydraulic conductivity (cm/d))

داده‌ها قبل از استفاده برای مدل‌سازی با برنامه‌ریزی بیان ژن، طبق معادله ۱ بین دو عدد ۰/۱ و ۰/۹ نرمال استاندارد شدند (۱۳) و پس از مدل‌سازی به مقادیر اولیه برگشتند.

$$x_i = 0.8\left(\frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}\right) + 0.1 \qquad (۱)$$

که در این معادله x_i: مقدار استاندارد شده، x: مقدار واقعی و x_{min} و x_{max}: به ترتیب مقادیر حداقل و حداکثر داده‌ها می‌باشد.

برنامه‌ریزی بیان ژن

الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) مشابه الگوریتم‌های ژنتیک (GA) و برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) است، چون از جمعیتی از افراد استفاده می‌کند، آن‌ها را براساس برازش انتخاب می‌کند و با استفاده از عملگرهای ژنتیکی تنوع ژنتیکی ایجاد می‌کند. تفاوت بنیادی بین سه الگوریتم به ماهیت افراد برمی‌گردد: در الگوریتم ژنتیک افراد کروموزوم‌هایی با طول ثابت هستند، در برنامه‌ریزی ژنتیک افراد درخت‌های غیرخطی با اندازه و شکل‌های متفاوت هستند و در برنامه‌ریزی بیان ژن افراد کروموزوم‌هایی با طول ثابت هستند که به صورت درخت‌های بیانی با اندازه و شکل‌های متفاوت بیان می‌شوند. بزرگترین تفاوت GEP با GP در این است که در GEP، با استفاده از عملگرهای ژنتیکی امکان ایجاد هرگونه تعییر در ژنوم، بدون محدودیت وجود دارد و نیز اینکه به فرآیندهای

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.22.23.9]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.22.155]

پیچیده تصحیح کردن و یا راهکارهای قوی برای استفاده از عملگرهای ژنتیکی نیاز ندارد و قادر به تولید برنامه‌های صحیح می‌باشد (۶). در برنامه‌ریزی بیان ژن، ژنوم یا کروموزوم رشته‌هایی نمادین و خطی با طول ثابت هستند که این رشته‌ها از یک یا چند ژن تشکیل یافته‌اند. ژن‌های GEP از راس و دنباله تشکیل شده‌اند. راس شامل نمادهایی است که هم توابع و هم ترمینال‌ها را نمایش می‌دهد. در حالیکه دنباله تنها شامل ترمینال‌ها می‌باشد. فرآیند، با تولید تصادفی کروموزوم‌های جمعیت اولیه آغاز می‌شود. سپس کروموزوم‌ها بیان می‌شوند و برازش هر یک از افراد ارزیابی می‌گردد. سپس کروموزم‌ها براساس برازش انتخاب می‌شوند تا با تغییراتی تکثیر شوند و نسلی با ویژگی‌های جدید ایجاد شود. افراد این نسل جدید در معرض فرآیند توسعه مشابهی قرار می‌گیرند: بیان ژنوم، روبرو شدن با محیط انتخابی و بازتولید همراه با تغییرات. این فرآیند یا به تعداد نسل‌ها ادامه می‌یابد یا تا زمانیکه راه‌حل پیدا شود. باز تولید نه تنها شامل تکثیر نمی‌شود، بلکه عمل عملگرهای ژنتیکی نیز قادر به ایجاد تنوع ژنتیکی هستند.

برای استفاده از GEP، ۵ گام اساسی وجود دارد. گام اول انتخاب تابع برازش است. در این پژوهش تابع ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای مدل i با که شاخص E_i در معادله ۲ نشان داده شده، به عنوان تابع برازش انتخاب شد.

$$E_i = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\left(P_{(ij)} - T_{(j)}\right)^2} \qquad (۲)$$

که در این معادله $P_{(ij)}$ مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل i برای نمونه j، n تعداد نمونه‌ها و $T_{(j)}$ مقدار واقعی برای نمونه j است. در بهترین برازش، $P_{(ij)} = T_{(j)}$ و $E_i = 0$ است. شاخص E_i از صفر تا بی‌نهایت متغیر است که صفر مقدار ایده‌آل است. به دلیل اینکه شاخص E_i نمی‌تواند مستقیما برای ارزیابی برازش استفاده شود، بنابراین برای ارزیابی برازش f_i مدل i باید معادله ۳ به کار گرفته شود. مقدار f_i از صفر تا ۱۰۰۰ می‌تواند باشد و ۱۰۰۰ نشان‌دهنده بهترین حالت با بیشترین برازش است (۸ به نقل از ۲۵) .

$$f_i = 1000 \times \frac{1}{1 + E_i} \qquad (۳)$$

گام دوم انتخاب مجموعه ترمینال‌ها و مجموعه توابع برای ساخت کروموزوم‌ها است. توابع مورد استفاده شامل عملگرهای ریاضی بودند که در جدول ۲ آورده شده است. ترمینال‌ها نیز متغیرهای مستقل (ویژگی‌های زودیافت خاک) شامل درصد شن، سیلت، رس، کربن آلی، هدایت الکتریکی، درصد مواد خنثی شونده، اسیدیته، درصد اشباع، جرم مخصوص ظاهری و حقیقی خاک بودند. گام سوم طراحی کروموزوم‌ها است که باید طول راس و تعداد ژن‌ها مشخص شود. طول راس برابر ۷، تعداد ژن‌ها برابر ۳ و تعداد کروموزوم‌ها برابر ۳۰ انتخاب شد. برای گام چهارم تابع پیوندی (که برای پیوند درخت‌های بیانی استفاده می‌شود) مشخص می‌شود. تابع پیوندی عملگر جمع برای بیشتر مسائل مناسب است (۷) که در این پژوهش نیز از همین تابع استفاده شد. گام آخر شامل انتخاب عملگرهای ژنتیکی و مقدار هر کدام از آنها است. عملگرهای ژنتیکی هسته تمام الگوریتم‌های ژنتیک هستند. انتخاب و تکثیر در تمام الگوریتم‌های تکاملی عمومی هستند (که اغلب نیز منجر به ایجاد توده ژنتیکی و تولید جمعیتی با کاهش مداوم تنوع می‌شود و تا زمانیکه تمام افراد مشابه‌اند ادامه دارد.) استاندارد همه الگوریتم‌های تکاملی تغییر یا به عبارتی عملگرهای ژنتیکی هستند که منجر به تنوع می‌شوند. در برنامه‌ریزی بیان ژن معمولا از عملگرهای ژنتیکی جهش، بازترکیب (شامل بازترکیب یک نقطه‌ای، بازترکیب دو نقطه‌ای و بازترکیب ژنی)، و جابجایی (شامل جابجایی IS، جابجایی RIS و جابجایی ژنی) استفاده می‌شود (۷). عملگرهای ژنتیکی مورد استفاده در این پژوهش و مقدار آنها در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- تنظیمات مدل GEP

Table 2. Settings of the GEP model

پارامتر	تنظیمات پارامتر
عملگرهای ریاضی	$+.-.\times.\div.Ln.Log.1/x.$ $\sqrt{x}.\sqrt[3]{x}.exp.x^2.x^3.sinx.cosx.tanx.cotx.arctanx.tanhx$
جهش	۰/۰۴۴
وارونگی	۰/۱
جابجایی IS	۰/۱
جابجایی RIS	۰/۱
بازترکیب ژن	۰/۱
بازترکیب یک نقطه‌ای	۰/۳
بازترکیب دو نقطه‌ای	۰/۳
جابجایی ژن	۰/۱

در این پژوهش از نرم‌افزار GeneXproTools 5 برای پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از روش برنامه‌ریزی بیان ژن استفاده شد. داده‌ها پیش از مدل‌سازی به دو بخش تقسیم شدند، ۷۵٪ داده‌ها برای آموزش مدل و ۲۵٪ برای آزمون مدل استفاده شد.

توابع انتقالی

برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع علاوه بر مدل برنامه‌ریزی بیان ژن، از تعدادی از توابع انتقالی شناخته شده و مدل روزتا استفاده شد. توابع انتقالی رگرسیونی مورد استفاده در جدول ۳ آورده شده است. در تابع انتقالی ساکستون و همکاران (۲۲) برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع علاوه بر درصد شن و رس، از رطوبت اشباع (θ_s) نیز استفاده شده که معادله محاسبه آن در جدول ۳ آورده شده است (۲۲).

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.22.23.9]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.22.155]

جدول ۳- توابع انتقالی رگرسیونی

Table 3. Regression pedotransfer functions

منبع	معادله
پاکت و همکاران (۲۰)	$k_s = (4.36 \times 10^{-5} \times e^{-0.1975 \times clay}) \times 864 \times 10^4$
ساکستون و همکاران (۲۲)	$k_s = 24 \exp[(12.012 - 0.0755 sand + (-3.895 + 0.03671 sand - 0.1103 clay + 8.7546 * 10^{-4} (clay)^2)/\theta_s]$ $\theta_s = 0.332 - 7.251 \times 10^{-4} (sand) + 0.1276\ log_{10}(clay)$
جبرو (۱۰)	$k_s = (10^{9.56 - 0.81 \log(silt) - 1.09 \log(clay) - 4.64(Bd)}) \times 24$

پارامترهای sand، silt، clay به ترتیب درصد شن، سیلت و رس هستند. Bd وزن مخصوص ظاهری (gr/cm^3)، θ_s رطوبت اشباع (m^3/m^3) و k_s هدایت هیدرولیکی اشباع (cm/d) است.

مدل روزتا یک برنامه کامپیوتری براساس شبکه عصبی مصنوعی است که پنج تابع انتقالی سلسله مراتبی را برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی از جمله هدایت هیدرولیکی اشباع به کار می‌گیرد. تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از مدل روزتا را می‌توان با استفاده از پارمترهای ورودی کمتر (تنها بافت خاک) و یا پارامترهای ورودی بیشتر (درصد شن، سیلت، رس، وزن مخصوص ظاهری و یک یا دو نقطه از منحنی مشخصه رطوبتی) انجام داد (۲۴). در این پژوهش مدل SSCBD روزتا که از پارامترهای درصد شن، سیلت، رس و وزن مخصوص ظاهری برای تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع استفاده می‌کند به کار گرفته شد.

معیارهای ارزیابی مدل

معیارهای آماری ضریب تعیین[1] (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا[2] (RMSE) و میانگین قدر مطلق خطا[3] (MAE) برای ارزیابی کارایی مدل‌ها طبق معادلات ۴ تا ۶ محاسبه شدند. همچنین برای مشخص شدن کم برآورد یا بیش برآورد بودن مدل، از معیار میانگین خطای اریبی[4] (MBE) طبق معادله ۷ استفاده شد.

$$R^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^{N}(K_{oi} - \overline{K_o})(K_{si} - \overline{K_s})\right)^2}{\left(\sum_{i=1}^{N}(K_{oi} - \overline{K_o})^2 \sum_{i=1}^{N}(k_{si} - \overline{k_s})^2\right)} \quad (۴)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{(\sum(K_{si} - K_{oi})^2)}{N}} \quad (۵)$$

$$MAE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|k_{si} - k_{oi}| \quad (۶)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{N}(k_{si} - k_{oi})}{N} \quad (۷)$$

N: برابر تعداد کل داده‌ها، K_{si}: هدایت هیدرولیکی اشباع پیش‌بینی شده برای نمونه i، K_{oi}: هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری شده برای نمونه i، $\overline{K_o}$: میانگین مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری شده نمونه‌ها و $\overline{K_s}$: میانگین مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع پیش‌بینی شده همه نمونه‌ها است. مقدار R^2 از صفر تا یک متغیر است و هرچه به یک نزدیکتر باشد بهتر است. RMSE و MAE، دو معیار ارزیابی کیفیت مدل براساس میزان خطای پیش‌بینی هستند. از صفر تا بی‌نهایت متغیر هستند و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشند، مدل خطای کمتری دارد. مقادیر مثبت MBE بیانگر بیش‌برآورد بودن مدل و مقادیر منفی بیانگر کم برآورد بودن مدل است.

نتایج و بحث

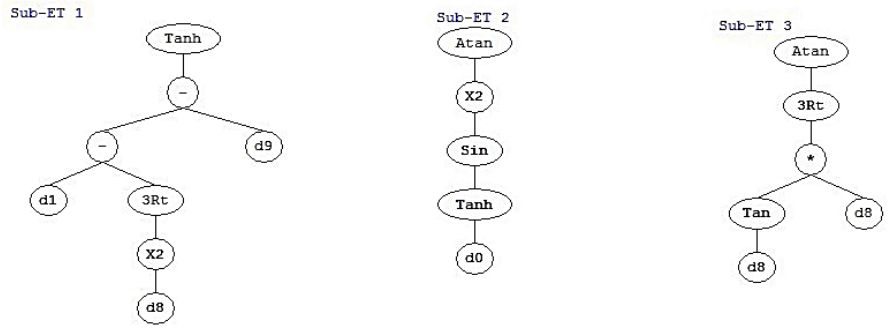
برنامه‌ریزی بیان ژن

برای پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع، مدل برنامه‌ریزی بیان ژن تا ۱۰۰۰۰ نسل آموزش داده شد و به دلیل انتخاب تصادفی جمعیت اولیه، ۵ بار اجرا شد. بهترین مدلی که ایجاد شد، از بین تمام پارامترهای مستقل، ۴ پارامتر شن، سیلت، جرم مخصوص ظاهری و جرم مخصوص حقیقی خاک را برای پیش‌بینی استفاده کرد. درخت‌های بیانی ایجاد شده که شامل توابع و متغیرهای مستقل است در شکل ۲ آمده است. تابع پیوندی این درخت‌ها جمع بود. معادله نهایی پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع براساس برنامه‌ریزی بیان ژن به صورت معادله ۸ به‌دست آمد. جرم مخصوص ظاهری و توزیع اندازه ذرات از پارامترهایی هستند که در بسیاری از توابع انتقالی ایجاد شده توسط پژوهشگران مانند وریکن و همکاران (۲۸)، وستن و همکاران (۲۹)، شاپ و همکاران (۲۴) برای پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع استفاده شده است. در این پژوهش، مدل برنامه‌ریزی بیان ژن از پارامتر جرم مخصوص حقیقی نیز به عنوان پارامتری مهم برای پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع استفاده کرده است.

$$\begin{aligned} k_s &= tanh\left[\left(silt - \left(\sqrt[3]{Pd^2}\right)\right) - Bd\right] \\ &+ Atan\left[\left(sin(\tanh sand)\right)^2\right] \\ &+ Atan\left[\sqrt[3]{((\tan Pd) \times Pd)}\right] \end{aligned} \quad (۸)$$

1- Coefficient of determination 2- Root Mean Squared Error 3- Mean Absolute Error 4- Mean Bias Error

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.22.23.9]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.22.155]



شکل ۲- درخت‌های بیانی ایجاد شده توسط مدل GEP
Figure 2. The Expression trees developed by the GEP model

معیارهای ارزیابی مدل در هر دو مرحله آموزش و آزمون محاسبه شد، که در جدول ۴ آورده شده است. در مرحله آموزش، مدل با RMSE برابر ۲/۵۷ سانتی متر بروز خطای نسبتا بالایی را در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع نشان داده و در مرحله آزمون نیز که عملکرد مدل در برابر داده‌های جدید سنجیده شد، خطای RMSE برابر ۲/۸۴ سانتی‌متر بر روز به‌دست آمد. معیار R^2 در مراحل آموزش و آزمون به ترتیب ۰/۹۲ و ۰/۹۱ به دست آمد و با توجه به نمودار a شکل ۳ که پراکنش داده‌های اندازه‌گیری شده در برابر مقادیر پیش‌بینی شده در مرحله آزمون را نشان می‌دهد، اکثر نقاط حول خط رگرسیونی مرجع قرار گرفتند. معیار MAE نیز در مرحله آزمون مقدار بیشتری نسبت به مرحله آموزش داشت و می‌توان گفت که مدل به داده‌های آموزشی بیش برازش داشته، البته این تفاوت کم بوده است.

جدول ۴- معیارهای ارزیابی مدل GEP در مراحل آموزش و آزمون
Table 4. Evaluation statistics of the GEP model in training and testing steps

	R^2	RMSE (cm/d)	MAE (cm/d)
آموزش	۰/۹۲	۲/۵۷	۱/۶۷
آزمون	۰/۹۱	۲/۸۴	۱/۸۹

مقایسه برنامه‌ریزی بیان ژن و توابع انتقالی

پس از مدل‌سازی با روش برنامه‌ریزی بیان ژن، ۴ روش دیگر نیز برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع استفاده شد و نتایج این روش‌ها با برنامه‌ریزی بیان ژن مقایسه شد. در مدل روزتا به دلیل اینکه پیش‌بینی یکی از نمونه‌ها با خطا مواجه شده بود، به ناچار معیارهای ارزیابی این مدل از روی سایر نمونه‌ها محاسبه شد. معیارهای ارزیابی هر یک از روش‌های مورد استفاده در جدول ۵ آورده شده است. با مقایسه معیارهای ارزیابی جدول ۵ مشخص شد که بین این روش‌ها، برنامه‌ریزی بیان ژن با کمترین خطای RMSE و MAE و بالاترین مقدار R^2 بهترین عملکرد را نشان داده است. در نمودار a شکل ۳ نیز، تمرکز اکثر نقاط حول خط رگرسیونی مرجع است و مقادیر پیش‌بینی شده تطابق نسبتا خوبی با مقادیر واقعی دارند. پس از آن تابع انتقالی جبرو (۱۰) نسبت به سایر روش‌ها، خطای کمتر و مقادیر R^2 بالاتری را نشان داده است. پس از آن مدل روزتا نسبت به دو تابع انتقالی پاکت و همکاران (۲۰) و ساکستون و همکاران (۲۲) بهترین عملکرد را داشت. تابع انتقالی ساکستون و همکاران (۲۲) پایین‌ترین عملکرد را در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع نشان داد.

با توجه به نمودارهای a و b شکل ۳، تمرکز اکثر نقاط حول خط رگرسیونی مرجع است و بیشترین تطابق مقادیر اندازه‌گیری شده با مقادیر واقعی مربوط به مدل‌های برنامه‌ریزی بیان ژن و تابع انتقالی جبرو (۱۰) است. در شکل ۳، نمودارهای b، c و e اکثر نقاط زیر خط رگرسیونی مرجع قرار دارند و همچنین با توجه به مقادیر منفی به دست آمده برای معیار MBE مدل‌های جبرو (۱۰)، روزتا و پاکت و همکاران (۲۰) مشخص است که هدایت هیدرولیکی اشباع، کمتر از مقادیر واقعی برآورد شده و بنابراین این مدل‌ها کم برآورد بودند. مقدار MBE برابر ۵/۹۶+ برای مدل ساکستون و همکاران (۲۲) نشان می‌دهد این مدل بیش‌برآورد بوده است. بنابراین با توجه به معیار MBE، تمام مدل‌های مورد استفاده یعنی مدل های برنامه‌ریزی بیان ژن، جبرو (۱۰)، روزتا و پاکت و همکاران (۲۰) کم برآورد بودند و مدل ساکستون و همکاران (۲۲) بیش برآورد بود. مدل روزتا که برپایه شبکه عصبی مصنوعی است نتایج بهتری نسبت به روابط رگرسیونی نداشته و نسبت به مدل برنامه‌ریزی بیان ژن و تابع انتقالی جبرو (۱۰) که از روش رگرسیونی ایجاد شده، دقت پایین‌تری در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع نشان داده است. مدل پاکت و همکاران (۲۰) دقت پایین‌تری نسبت به سایر روش‌ها به جز تابع انتقالی ساکستون و همکاران (۲۲) نشان داده است که احتمالا دلیل آن استفاده از تنها یک پارامتر پیش‌بینی کننده یعنی درصد رس، برای تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع بوده است. با بررسی داده‌های مورد استفاده در این پژوهش، مشخص شد که پارامترهای وزن مخصوص ظاهری و وزن مخصوص حقیقی بیشترین همبستگی را با هدایت هیدرولیکی اشباع داشتند، درحالیکه درصد رس همبستگی بسیار پایینی با هدایت هیدرولیکی اشباع داشت. در مدل برنامه‌ریزی بیان ژن نیز از این دو پارامتر (وزن مخصوص ظاهری و وزن مخصوص حقیقی) برای پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع استفاده شده است.

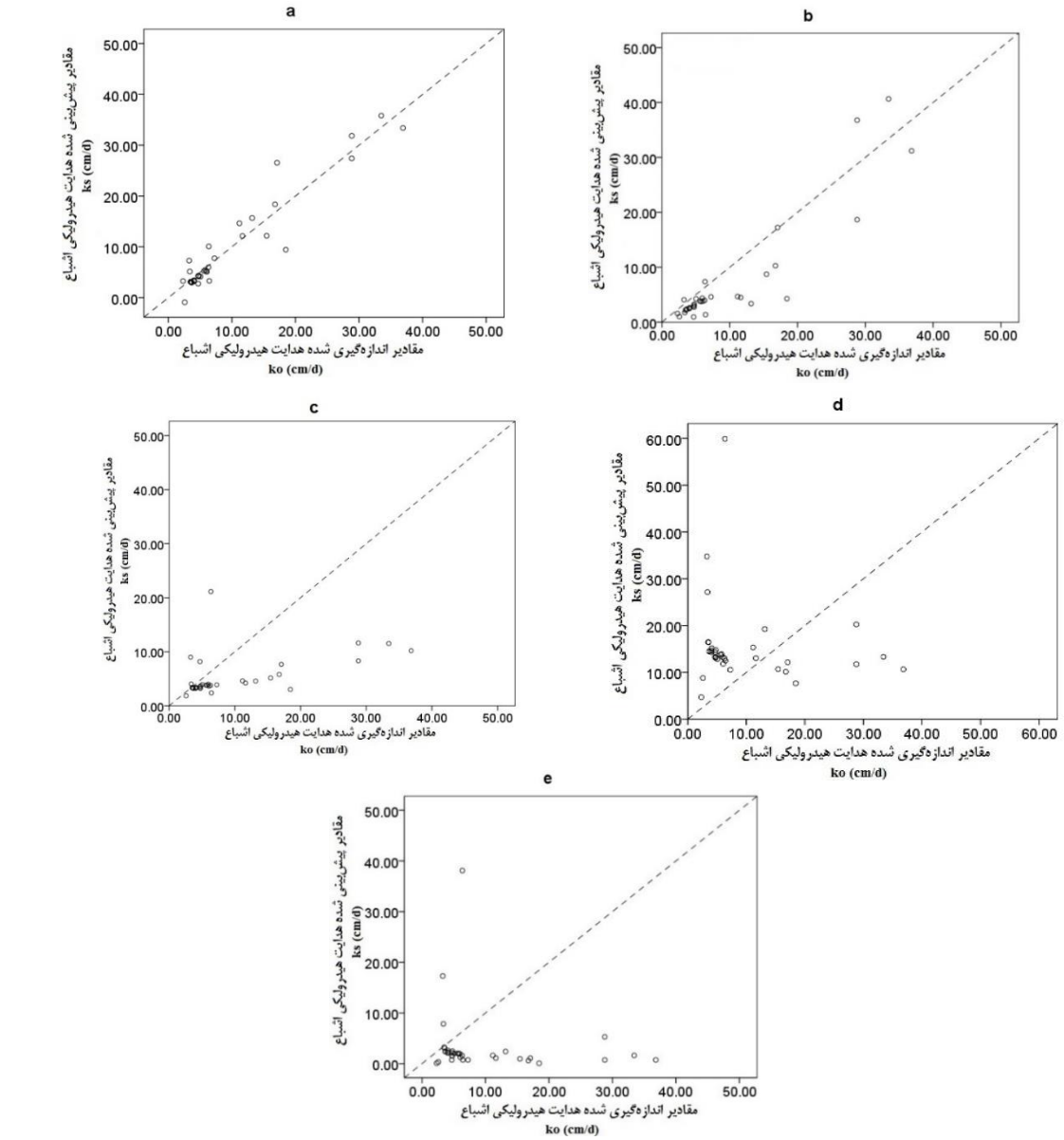
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.22.23.9]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.22.155]

تفاوت داده‌های مورد استفاده در این پژوهش، بافت خاک و خصوصیات آن، با داده‌هایی که برای ایجاد توابع انتقالی جبرو (۱۰)، روزتا، ساکستون و همکاران (۲۲) و پاکت و همکاران (۲۰) استفاده شده، ممکن است که در پایین‌تر بودن دقت این توابع نسبت به مدل برنامه‌ریزی بیان ژن تاثیر داشته. توفور و همکاران (۲۷) نیز گزارش کردند دقت مدلی که از داده‌های محلی ایجاد شده، بالاتر از توابع انتقالی شناخته شده است که از داده‌هایی متفاوت ایجاد شده‌اند (۲۷) و عملکرد پایین مدل‌های جبرو (۱۰)، روزتا، پاکت و همکاران (۲۰) و ساکستون و همکاران (۲۲) نیز تحت تاثیر همین بوده است.

جدول ۵- معیارهای ارزیابی مدل‌های استفاده شده

Table 5. Evaluation statistics of the applied models

تابع انتقالی	R^2	RMSE (cm/d)	MAE (cm/d)	MBE (cm/d)
برنامه‌ریزی بیان ژن	۰/۹۱	۲/۸۴	۱/۸۹	-۰/۰۷
جبرو (۱۰)	۰/۸۲	۴/۷۴	۳/۴۶	-۲/۵۳
روزتا (۲۴)	۰/۲۳	۹/۰۶	۵/۷۸	-۴/۴۱
پاکت و همکاران (۲۰)	۰/۰۲	۱۳/۲۶	۸/۹۲	-۶/۲۱
ساکستون و همکاران (۲۲)	۰/۰۲	۱۴/۷۴	۱۱/۳۱	۵/۹۶



شکل ۳- پراکنش مقادیر اندازه‌گیری شده (ko) و پیش‌بینی شده (ks) هدایت هیدرولیکی اشباع (سانتی‌متر بر روز) برنامه‌ریزی بیان ژن (a)، جبرو (۱۰) (b)، روزتا (c)، ساکستون و همکاران (۲۲) (d)، پاکت و همکاران (۲۰) (e)

Figure 3. Scatter of measured (ko) and estimated (ks) values for saturated hydraulic conductivity (cm/d), GEP (a), Jabro (10) (b), Rosetta (c), Saxston et al. (22) (d), Puckett et al. (20) (e)

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.22.23.9]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.22.155]

هدایت هیدرولیکی اشباع خاک یکی از خصوصیات فیزیکی خاک است که بر روابط آب و خاک تاثیر دارد. اما اندازه‌گیری آن به روش‌های مزرعه‌ای و آزمایشگاهی که به روش‌های مستقیم معروفند دشوار، زمانبر و پرهزینه هستند. تاکنون روش‌های غیرمستقیم که یکی از پرکاربردترین آن‌ها توابع انتقالی است، برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع از روی خصوصیات زودیافت خاک ایجاد شده‌اند و امکان برآورد آن را با صرف وقت و هزینه کمتر ایجاد کرده‌اند. در این پژوهش از مدل برنامه‌ریزی بیان ژن که روشی مبتنی بر داده و از الگوریتم‌های تکاملی است برای ایجاد توابع انتقالی و برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از ویژگی‌های زودیافت خاک استفاده شد، و با توابع انتقالی شناخته شده پاکت و همکاران (۲۰)، ساکستون و همکاران (۲۲)، جبرو (۱۰) و نیز مدل روزتا که برپایه شبکه‌های عصبی مصنوعی است مقایسه شد. مدل برنامه‌ریزی بیان ژن برای تمام نمونه‌های خاک معادله‌ای ایجاد کرد که این معادله از چهار پارامتر درصد شن، سیلت، وزن مخصوص ظاهری و وزن مخصوص حقیقی برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع استفاده کرد. در واقع از میان ۱۱ پارامتر موثر تنها از چهار پارامتر زودیافت خاک برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع استفاده کرد که این در کاهش تعداد پارامترهای مورد نیاز برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع مناسب است. البته پیش‌بینی این مدل با کمی خطا همراه بود. با توجه به معیارهای ارزیابی مشخص شد که همه روش‌های مورد استفاده، هدایت هیدرولیکی اشباع را با مقادیر متفاوتی از خطا پیش‌بینی کردند. در بین این روش‌ها، مدل برنامه‌ریزی بیان ژن و پس از آن تابع انتقالی جبرو (۱۰) خطای کمتر و دقت بالاتر، و مدل ساکستون و همکاران (۲۲) پایین‌ترین دقت را در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع نشان دادند. البته این نتایج مربوط به این بافت خاک بوده و برای مناطق دیگر نتایج می‌تواند متفاوت باشد. پیشنهاد می‌شود که از روش برنامه‌ریزی بیان ژن، جهت ایجاد توابع انتقالی برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع برای هر بافت خاک به طور جداگانه استفاده شود و کارایی توابع ایجاد شده نیز بررسی گردد. مزایای روش برنامه‌ریزی بیان ژن در سهولت کاربرد آن، عدم نیاز به تعیین نوع معادله‌ی برآورد کننده هدایت هیدرولیکی اشباع و انتخاب تعداد کمتری از پارامترها از بین تمامی پارامترهای موثر برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع است. بنابراین برای این داده‌ها و این بافت خاک، مدل برنامه‌ریزی بیان ژن مناسب‌ترین روش برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع بود.

منابع

1. Abbasi, F. 2017. Advanced soil physics. 4th edition. Tehran university press, Tehran, Iran, 320 pp (In Persian).
2. Ahmadi, A., P. Palizvan zand and H. Palizvan zand. 2018. Estimation of saturated hydraulic conductivity by using gene expression programming and ridge regression (A case study in East Azerbaijan province). Iranian Journal of Soil and Water Research. 48(5): 1087-1095 (In Persian).
3. Bybordi, M. 2008. Principles of land drainage. 10th edition. University of Tehran Press, Tehran, Iran, 641 pp (In Persian).
4. Cosby, B.J., G.M. Hornberger, R.B. Clapp and T.R. Ginn. 1984. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. Water Resourses Research, 20(6): 682-690.
5. Ebrahimi, K. and H. Fardad. 1999. Comparision of some determination of hydraulic conductivity coefficient in saturated soil condition. Iranian Journal of Agriculture Science. 29(4): 657-666 (In Persian).
6. Ferreira, C. 2001. Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems. Complex Systems, 13(2): 87-129.
7. Ferreira, C. 2001. Gene Expression programming in problem solving. WSC6 tutorial. invited tutorial of the 6th Online World Conference on Soft Computing in Industrial Applications, September, 10-24.
8. Ferreira, C. 2006. Automatically defined functions in gene expression programming. In: Nedjah, N., Mourelleh, L. de M., A. Abraham. (Eds), Genetic System Programming: Theory and Expressions, Studies in computational intelligence, 13. Springer, Verlag, 21-56.
9. Hashmi, M.Z., A.Y. Shamseldin and B.W. Melville. 2011. Statistical downscaling of watershed precipitation using Gene Expression Programming (GEP). Environmental Modelling and Software, 26(12): 1639-1646.
10. Jabro, J.D. 1992. Estimation of saturated hydraulic conductivity of soils from particle size distribution and bulk density data. American Soiciety of Agricultural Engineering, 35(2): 557-560.
11. Jalali, V.R. and M. Homaee. 2011. Introducing a nonparametric model using k-nearest neighbor technique for predicting soil bulk density. Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, Water and Soil Science, 15(56): 181-191 (In Persian).
12. Khaledian, M., M. shabanpour and H. Alinia. 2016. Saturated hydraulic conductivity variation in a small garden under drip irrigation. Geosystem Engineering, 19(6): 266-274.
13. Khashei Siuki, A., V.R. Jalali Moakhar, A.M. Noferesti and Y. Ramazani. 2015. Comparing nonparametric k-nearest neighbor technique with ANN model for predicting soil saturated hydraulic conductivity. Journal of Soil Management and Sustainable Production, 5(3): 81-95 (In Persian).
14. Landeras, G., J.J. López, O. Kisi and J. Shiri. 2012. Comparison of Gene Expression Programming with neuro-fuzzy and neural network computing techniques in estimating daily incoming solar radiation in the Basque Country (Northern Spain). Energy Conversion and Management, 62: 1-13.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.22.23.9]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.22.155]

15. Mallants, D., B.P. Mohanty, A. Vervoort and J. Feyen. 1997. Spatial analysis of saturated hydraulic conductivity in a soil with macropores. Soil Technology, 10: 115-131.
16. Minasny, B. and A.B. McBratney. 2000. Evaluation and development of hydraulic conductivity pedotransfer functions for Australian soil. Soil Research, 38(4):905-926.
17. Pallant, J. 2007. SPSS survival manual: a step by step guide to data analysis. Translated by Rezaei, A. Forouzesh, Tabriz, Iran, 414 pp (In Persian).
18. Parasuraman, K., A. Elshorbagy and B.C. Si. 2007. Estimating saturated hydraulic conductivity using genetic programming. Soil Science Society of America Journal, 71(6): 1676-1684.
19. Pachepsky, Y. and M.T. Van Genuchten. 2011. Pedotransfer functions. In: J. Glinski, J. Horabik, J. Lipiec, (eds) Encyclopedia of Agrophysics. 556-561. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht
20. Puckett, W.E., J.H. Dane and B.F. Hajek. 1985. Physical and Mineralogical Data to Determine Soil Hydraulic Properties 1. Soil Science Society of America Journal, 49(4): 831-836.
21. Ritter, A., F. Hupet, R. Muñoz-Carpena, S. Lambot and M. Vanclooster. 2003. Using inverse methods for estimating soil hydraulic properties from field data as an alternative to direct methods. *Agricultural Water Mangement*, 59: 77-96.
22. Saxton, K.E., W. Rawls, J.S. Romberger and R.I. Papendick. 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture 1. Soil Science Society of America Journal, 50(4): 1031-1036.
23. Schaap, M.G., F.J. Leij and Van M.T. Genuchten. 1998. Neural network analysis for hierarchical prediction of soil hydraulic properties. Soil Science Society of America Journal, 62(4): 847-855.
24. Schaap, M.G., F.J. Leij and Van M.T. Genuchten. 2001. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. Journal of hydrology, 251(3-4): 163-176.
25. Shiri, J., Ö. Kişi, G. Landeras, J.J. López, A.H. Nazemi and L.C. Stuyt. 2012. Daily reference evapotranspiration modeling by using genetic programming approach in the Basque Country (Northern Spain). Journal of Hydrology, 414: 302-316.
26. Tietje, O. and V. Hennings. 1996. Accuracy of the saturated hydraulic conductivity prediction by pedo-transfer functions compared to the variability within FAO textural classes. Geoderma, 69(1-2): 71-84.
27. Tuffour, H.O., A. Abubakari, A.A. Agbeshie, A.A. Khalid, E.N. Tetteh, A. Keshavarzi, and L. Danso. 2019. Pedotransfer Functions for Estimating Saturated Hydraulic Conductivity of Selected Benchmark Soils in Ghana. Asian Soil Research Journal, 1-11.
28. Vereecken, H., J. Maes and J. Feyen. 1990. Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties. Soil Science, 149(1): 1-12.
29. Wösten, J.H.M., A. Lilly, A. Nemes, and C. Le Bas. 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. Geoderma, 90(3-4): 169-185.
30. Yassin, M.A., A.A. Alazba and M.A. Mattar. 2016. A new predictive model for furrow irrigation infiltration using gene expression programming. Computers and Electronics in Agriculture, 122: 168-175.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.22.23.9]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.22.155]

Estimating the Saturated Hydraulic Conductivity of Soil Using Gene Expression Programming Method and Comparing It with the Pedotransfer Functions

Mahnoosh Farzadmehr[1], Mehdi Dastourani[2], Abbas Khashei Siuki[3] and Vahidreza Jalali Moakhar[4]

1 and 3- Graduated M.Sc. Student and Professor, Department of Water Science and Engineering, University of Birjand
2- Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, University of Birjand,
(Corresponding author: mdastourani@birjand.ac.ir)
4- Associate Professor, Higher Education Complex of Shrivan
Received: September 21, 2019 Accepted: March 28, 2020

Abstract

Saturated hydraulic conductivity of soil is an important physical property of soil that affects water movement in soil, Since the measurement of saturated hydraulic conductivity by direct methods in the field or in the laboratory is hard, time-consuming and costly, the indirect methods are being used.The aim of this study is to estimate the saturated hydraulic conductivity from other soil properties by using the Gene Expression Programming (GEP) method and some well-known pedotransfer functions and the Rosetta model, and then to compare their performances. A dataset including 151 soil samples obtained from a site in Bojnord province was used in this study. The soil properties used were sand, silt and clay percentage, organic carbon percentage, TNV, EC, saturated moisture, pH, bulk density and particle density. Modeling process using the GEP was done by using all of these properties as input parameters. The GEP model used only four properties, sand and silt percentages, bulk density and particle density, in its developed function to estimate saturated hydraulic conductivity. This model with RMSE=2.84 (cm/d) and R^2=0.91 showed the best performance in comparison to the other pedotransfer functions. After the GEP, the Jabro (1992) pedotransfer function with RMSE = 4.74 (cm/d) and R^2 = 0.82 was the best model in comparison to the rest of the pedotransfer functions and the Rosetta model. Saxton et al (1986), had the least accurate k_s estimation among all methods. Since different data sets had been used to develop each of the pedotransfer functions and also because of high spatial variability of k_s, there was a large difference between RMSE, MAE and MBE errors of the used methods. For the dataset of this study, the GEP model showed the best performance in estimating k_s among other methods and its advantages were choosing model structure and important parameters to estimate k_s.

Keywords: Evolutionary Algorithm, Gene Expression Programming Algorithm, Indirect Methods, Pedotransfer Functions, Rosetta

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.22.23.9]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.22.155]