

## مدل‌سازی هزینه طراحی و اجرای سامانه‌های آبیاری قطره‌ای

مسعود پورغلام آمیجی<sup>۱</sup>، عبدالمجید لیاقت<sup>۲</sup> و خالد احمدالی<sup>۳\*</sup>

۱ و ۲- به ترتیب: دانشجوی دکتری؛ و استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران  
۳- استادیار گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران  
تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱/۶

### چکیده

تخصیص اعتبار به اجرای طرح‌های آبیاری تحت فشار به منظور صرفه‌جویی در مصرف منابع آب و انرژی و برای افزایش امنیت غذایی، یکی از اهداف دولت‌ها در دهه‌های اخیر است. به همین دلیل، داشتن پیش‌آگاهی از هزینه‌ها امری ضروری است. این پژوهش با هدف برآورد هزینه پروژه‌های آبیاری قطره‌ای در مراحل اولیه طراحی از روش برنامه‌ریزی ژنتیک و با استفاده از داده‌های ۱۰۰ پروژه آبیاری قطره‌ای، در چهار بخش شامل هزینه ایستگاه پمپاژ و سیستم کنترل مرکزی (TCP)، هزینه لوازم داخل مزرعه (TCF)، هزینه نصب و اجرای داخل مزرعه و ایستگاه پمپاژ (TCI) و هزینه کل (TCT) اجرا شد. ابتدا یک بانک اطلاعاتی شامل ۳۹ متغیر مهم و تاثیرگذار در هزینه بخش‌های ذکر شده تهیه و قیمت پروژه‌ها برای سال پایه ۱۳۹۸ به‌روز رسانی شد. در مرحله بعد، مهم‌ترین ویژگی‌هایی که بیشترین تأثیر را در هزینه‌ها داشتند با استفاده از نرم‌افزار Eureka و بهره‌گیری از برنامه‌ریزی ژنتیک انتخاب شدند. در مرحله آخر، مدل‌های مختلفی در هر بخش برای برآورد هزینه ارائه و بر اساس آماره‌های دقت و پیچیدگی، مدل‌های برتر در هر بخش معرفی شدند. نتایج آنالیز همبستگی بین متغیرهای مستقل با متغیر وابسته (هزینه هر بخش) نشان داد که در بخش TCP متغیر Pp (توان پمپ مورد نیاز)، در بخش TCF متغیر L16mm (طول کل لترال)، در بخش TCI متغیر SR (فاصله ردیف گیاهان) و در بخش TCT متغیر Hp (ارتفاع پمپاژ) به ترتیب بیشترین ضریب همبستگی معادل ۰/۷۷، ۰/۶۴، ۰/۳۶ و ۰/۴۳ را داشته‌اند و در سطح اطمینان یک درصد معنی‌دار هستند. همچنین، نتایج مدل‌سازی هزینه سامانه آبیاری قطره‌ای نشان داد که در بخش TCP مدلی با معیار ارزیابی R برابر ۰/۴۵، MAE (میانگین قدر مطلق خطا) برابر با ۲۷۲۳۶۳۳۳ ریال و پیچیدگی ۲۲ بهترین مدل است و این معیارهای ارزیابی در بخش TCF برابر ۰/۸۵، ۲۱۱۹۸۲۵۷ ریال و ۱۳، در بخش TCI برابر ۰/۷۷، ۴۵۴۸۳۹۹۶ ریال و ۱۱، و در بخش TCT به ترتیب ۰/۷۴، ۷۷۲۲۰۸۴۵ ریال و ۱۵ حاصل گردید.

### واژه‌های کلیدی

آبیاری تحت فشار، برآورد هزینه، الگوریتم ژنتیک، انتخاب ویژگی، Eureka Formulize

و در عین حال یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های قرن حاضر است که می‌تواند سرمنشأ بسیاری از تحولات

### مقدمه

آب یکی از مهم‌ترین منابع موردنیاز جامعه بشری

کشاورزی، تغییر شیوه‌های سنتی آبیاری و استفاده از سامانه‌های نوین آبیاری است. استفاده از روش‌های نوین آبیاری علاوه بر تأثیر در به‌زراعی محصولات کشاورزی مخصوصاً امکان استفاده بیشتر و بهتر از آب موجود، از فرسایش خاک نیز جلوگیری خواهد کرد. همچنین تأمین رطوبت کافی و جلوگیری از تلفات، منجر به کارایی بیشتر مصرف آب و جلوگیری از مصرف بیش از حد آب در کشاورزی خواهد شد (El-Shater *et al.*, 2017; Valentín *et al.*, 2020; Flores *et al.*, 2021). اهمیت کشاورزی آبی و توسعه سامانه‌های آبیاری در این بخش بدین منظور است که حدود ۷۰ درصد جمعیت دنیا در محدوده اراضی دیم و بقیه در محدوده اراضی آبی زندگی می‌کنند. بنابراین، بدون آبیاری و کشاورزی تأمین غذای کافی برای جمعیت کنونی دنیا امکان‌پذیر نیست (Gany *et al.*, 2019; Yin *et al.*, 2021). از طرف دیگر، بخش کشاورزی ۷۰ درصد از آب شیرین را در جهان مصرف می‌کند، در حالی که این مقدار در مناطقی مانند خاورمیانه و آفریقای شمالی که دچار کمبود شدید آب هستند، به بیش از ۹۰ درصد می‌رسد (Afshar & Fahmi, 2019; Oki, 2020).

در بسیاری از کشورها مانند ایران، کشت آبی عامل اصلی تولید غذا و آبیاری نقش کلیدی در افزایش تولید محصولات کشاورزی در ۵۰ سال گذشته داشته است. سرعت توسعه آبیاری در دنیا با روندی کاهشی از سال ۱۹۹۰ به کمتر از یک درصد در سال رسیده و پیش‌بینی می‌شود که به دلیل هزینه‌های سنگین احداث سامانه‌های آبیاری در ۲۵ سال آینده به ۰/۶ درصد برسد. این مسئله در حالی عنوان می‌شود که زمین‌های باقیمانده عمدتاً دارای محدودیت‌های فراوانی همچون محدودیت‌های فنی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی هستند

مثبت و منفی جهان قرار گیرد (Gholizadeh-Sarabi *et al.*, 2019). نبود تعادل بین عرضه و تقاضای آب می‌تواند بحران آفرین باشد و این بحران در بُعد محلی، منطقه‌ای، ملی و حتی در بُعد جهانی رخ دهد.؛ (Hamdi Ahmadabad *et al.*, 2019; Bakas *et al.*, 2020). مطالعات مختلفی وجود دارد که در آنها خطرهای ناشی از کمبود آب و آسیب‌پذیری منابع آب را در مقیاس منطقه‌ای و جهانی بررسی شده است (Cosgrove & Rijsberman, 2014; Ahmadaali *et al.*, 2017; Vaghefi *et al.*, 2019; Yin *et al.*, 2021). افزایش روز افزون جمعیت و در پی آن نیاز به تولید مواد غذایی موجب استفاده بیشتر و گسترده‌تر از منابع طبیعی، به خصوص منابع آبی، شده است (Najarchi *et al.*, 2019; Pourgholam-Amiji *et al.*, 2020). مطابق پیش‌بینی‌ها، طی ۲۵ سال آینده نیاز به تولیدات گیاهی دو برابر خواهد شد اما مشکل کمبود منابع آب مانعی است در برابر تولید محصولات کشاورزی. بنابراین با توجه به اینکه بخش کشاورزی، بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب است، نوک پیکان به این سمت خواهد بود و تلاش برای کاهش مصرف آب در این بخش و افزایش بهره‌وری آب، امری ضروری و الزامی به نظر می‌رسد (Hassani *et al.*, 2020; Valentín *et al.*, 2020; Pourgholam-Amiji *et al.*, 2020).

توسعه فناوری در زمینه آبیاری دقیق، صرفه‌جویی در مصرف آب کشاورزی، افزایش راندمان آبیاری، کاهش تبخیر آب از سطح خاک، امکان صرفه‌جویی در انرژی، کاهش هزینه‌های تولید و غیره باعث شده تا سامانه‌های آبیاری تحت فشار به سرعت رو به گسترش و پیشرفت باشند. بنابراین، از مهم‌ترین راهکارهای ارائه شده در مدیریت بهینه مصرف آب و افزایش راندمان آبیاری در بخش

(1997, *al.*, بنابراین، برآورد هزینه اولیه نقش مهمی در تصمیمات اولیه پروژه ساخت‌وساز بازی می‌کند، حتی زمانی که پروژه هنوز نهایی نشده و اطلاعات بسیار محدودی درباره طراحی دقیق در این مراحل اولیه در دسترس است. برآورد هزینه با دقت بالا در مرحله اولیه پروژه‌های ساختمانی نقش اساسی در موفقیت هر پروژه ساختمانی دارد (Arafa & Alqedra, 2011; Chandanshive & Kambekar, 2021; Ekung *et al.*, 2019). علاوه بر این، پیش‌بینی هزینه نقش کلیدی در اتمام موفقیت‌آمیز پروژه‌های ساختمانی دارد. با توجه به کمبود اطلاعات، جزئیات، نقشه‌ها و بسیاری از عوامل مهم مؤثر در برآورد هزینه در مرحله برنامه‌ریزی، پروژه در معرض خطر قرار خواهد گرفت. بنابراین، برآورد هزینه نقش مهمی در تصمیمات پروژه ساخت‌وساز دارد و برای موفقیت در پروژه‌های عمرانی به برآورد هزینه با دقت زیاد و خطای کمتر نیاز خواهد بود (Arage & Dharwadkar, 2017; Alshahethi & Radhika, 2018; Karbachevsky *et al.*, 2021).

روش‌های مختلفی برای تخمین هزینه‌ها در دسترس است. با افزایش قدرت محاسبات، اکنون تمایل به استفاده از روش‌های مبتنی بر ماشین یادگیری<sup>1</sup> (ML) مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی<sup>2</sup> (ANN)، منطق فازی<sup>3</sup> (FL)، الگوریتم ژنتیک<sup>4</sup> (GA) شامل برنامه‌ریزی بیان ژن<sup>5</sup> (GEP) و برنامه‌ریزی ژنتیک<sup>6</sup> (GP) و غیره برای برآورد دقیق‌تر مدت و هزینه‌های پروژه وجود دارد که می‌تواند با وجود جزئیات ناکافی در مرحله اولیه و با داده‌های کم اما همچنان قابل اعتماد باشند و روابط غیرخطی بین عوامل هزینه و هزینه پروژه را شناسایی کنند (Cheng *et al.*, 2010; Kadkhodaie *et al.*, 2020).

(FAOSTAT, 2018). در گزارشی گفته شده که ماهیت سامانه‌های آبیاری تحت فشار در صرفه‌جویی مصرف آب اثبات شده است (Perry *et al.*, 2017). در ایران تا سال ۱۳۹۵ مساحتی بالغ بر ۱/۴۵ میلیون هکتار از زمین‌های آبی و تا پاییز سال ۱۳۹۹، مساحتی به اندازه ۲/۵ میلیون هکتار از این زمین‌ها به سامانه‌های آبیاری تحت فشار مجهز شده‌اند. با این حساب، کمتر از ۳۰ درصد زمین‌های آبی در کشور تحت پوشش سامانه‌های نوین آبیاری قرار گرفته‌اند و این موضوع اهمیت بررسی نقاط ضعف و قوت، مدل‌سازی اقتصادی سامانه‌ها و به‌ویژه برآورد هزینه سامانه آبیاری پیش از احداث را نشان می‌دهد.

در دنیای رقابتی، با کاهش حاشیه سود و کاهش سهم بازار، هزینه هر پروژه یکی از معیارهای مهم در تصمیم‌گیری در مراحل اولیه طراحی و اجراست. برای حفظ رقابت در بازار، بسیار مهم است شرکت‌ها تخمین مناسبی از هزینه پروژه‌های خود داشته باشند (Matel *et al.*, 2019). استفاده از روش‌ها و فرمول‌هایی که با استفاده از مجموعه‌ای از اطلاعات اولیه طرح مورد نظر بتواند هزینه آن را برآورد کند، کمک شایانی به شرکت‌های مهندسی مشاور فعال در مهندسی آب خواهد کرد و می‌تواند به عنوان راهکاری جامع برای برآورد هزینه‌های احداث سامانه تحت فشار قبل از اجرای آن استفاده شود. از روش‌های مختلفی که برای تخمین هزینه در مراحل مختلف هر پروژه استفاده شود، می‌توان روش‌های برآورد هزینه تفصیلی سنتی، تخمین هزینه ساده، برآورد هزینه بر اساس توابع هزینه، برآورد هزینه بر اساس فعالیت، روش شاخص هزینه و سامانه‌های خیره‌را نام برد (Zhang & Fuh, 1998; Pettang *et al.*, 2019).

1- Machine Learning

3- Fuzzy Logic

5- Gene Expression Programming

2- Artificial Neural Networks

4- Genetic Algorithm

6- Genetic Programming

داد. در پژوهشی دیگرا، گونییدین و دوگان (Günaydin & Doğan, 2004) نیز روشی مبتنی بر تئوری ANN را برای پروژه‌های ساخت‌وساز ارائه کردند و دقت مدل‌سازی را ۹۳ درصد به دست آوردند. اریج و دروادکر (Arage & Dharwadkar, 2017) با برآورد هزینه پروژه‌های ساختمانی با استفاده از تکنیک یادگیری ماشین با استفاده از اطلاعات ۱۲ ساله در منطقه پونه هند نشان دادند که مدل پیشنهادی دقت پیش‌بینی ۹۱ تا ۹۷ درصد را حاصل کرده‌است. بر اساس ANN در برآورد هزینه اولیه پروژه‌ها مطالعات دیگری نیز وجود دارد که می‌توان به نتایج تحقیق چندان‌شیوه و کمبه‌کار (Chandanshive & Kambekar, 2019) در برآورد هزینه ساخت‌وساز پروژه‌های ساختمانی بمبئی هند، الشاهتی و ردهیکا (Alshahethi & Radhika, 2018) در برآورد هزینه نهایی ساخت‌وساز پروژه ساختمانی یمن و وو و شی (Wu & Shih, 2020) در برآورد هزینه در مرحله طراحی اولیه معماری اشاره کرد که همه این مطالعات، توانایی بالای شبکه‌های عصبی را تأیید کردند.

از مطالعات موجود که دقت مناسب روش برنامه‌ریزی ژنتیکی و بیان ژن را تأیید کرده‌اند، می‌توان به این پژوهش‌ها اشاره کرد: نگوی-رابرتسون و همکاران (Nguy-Robertson *et al.*, 2012) در برآورد شاخص سطح برگ سبز در ذرت و سویا برای دستیابی به حداکثر حساسیت، کلوساس و همکاران (Closas *et al.*, 2013) در پیش‌بینی میزان آنفلوانزا با فیلترکردن ذرات، لارسن و همکاران (Larsen *et al.*, 2014) در مدل‌سازی پاسخ اکوسیستم جنگل به دی‌اکسید کربن و ازن با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، دمیرهان و آتیلگان (Demirhan & Atilgan, 2015) در تعیین مدل‌های تخمینی تابش

در حالی که استفاده از ANN برای برآورد هزینه از دید پیمانکاران فراوان است، مطالعات محدودی در مورد توسعه و کاربرد روش‌های مبتنی بر ML برای شرکت‌های مهندسی مشاور وجود دارد. با توجه به اینکه ماهیت محصولات / خدمات ارائه‌شده توسط شرکت‌های مهندسی مشاور ذاتاً با ماهیت محصولات / خدمات ارائه‌شده توسط پیمانکاران متفاوت است (یعنی آنها انتزاعی تر هستند و ماده کمتری دارند) و همچنین با توجه به اینکه نوع و سطح جزئیات اطلاعات موجود در مرحله مناقصه تفاوت دارد، بررسی کاربرد روش‌های مبتنی بر ML برای برآورد هزینه در شرکت‌های مشاوره مهم است (Zwaving, 2014; NASA, 2015; Lester, 2017; Alshahethi & Radhika, 2018; Matel *et al.*, 2019; Gransberg & Rueda, 2020). در مطالعات داخلی بیشتر پرداخته شده است به تحلیل اقتصادی سامانه‌های آبیاری با تغییر از یک سامانه به سامانه دیگر و تأثیر آن بر عملکرد محصولات و بهره‌وری، اما در مطالعات خارجی بیشتر به شناخت اجزای تأثیرگذار و برآورد هزینه‌های نهایی در پروژه‌های راه و ساختمان پرداخته شده است.

متل و همکاران (Matel *et al.*, 2019) از رویکرد شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) برای برآورد هزینه خدمات مهندسی استفاده کردند. این محققان پس از شناسایی عوامل مؤثر بر هزینه خدمات مهندسی، با استفاده از داده‌های ۱۳۲ پروژه ساختمانی مدلی تهیه کردند و نشان دادند که شبکه‌های عصبی مصنوعی حتی با داشتن مجموعه داده‌های کوچک می‌توانند تخمین هزینه نسبتاً دقیقی به دست آورند. مدل توسعه‌یافته در این مطالعه با توجه به میانگین درصد خطای مطلق (MAPE)<sup>۱</sup>، بهبود ۱۴/۵ درصد را در دقت مدل نشان

1- Mean Absolute Percentage Error

طراحان امکان‌پذیری اجرای پروژه را با اطمینان بالاتر ارائه می‌دهد و نیز کنترل هزینه‌های مؤثر در طراحی و اجرای پروژه را ممکن می‌سازد.

در این مطالعه، ابتدا با استفاده از روش برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) به شناسایی مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر هزینه قسمت‌های مختلف سامانه‌های آبیاری قطره‌ای پرداخته شده‌است. پس از آن، هزینه بخش‌های مختلف هزینه در این سامانه‌ها با استفاده از مهم‌ترین پارامترهای شناسایی شده در گام اول مدل‌سازی شده‌است.

### مواد و روش‌ها

هزینه پروژه‌های آبیاری تحت فشار در سه مرحله مدل‌سازی شد. این سه مرحله عبارتند از: ۱- جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز و به‌روزرسانی هزینه تمام‌شده پروژه‌ها، ۲- انتخاب ویژگی‌های برتر و ۳- آموزش و اعتبارسنجی مدل برآورد هزینه اولیه هزینه ایستگاه پمپاژ و سیستم کنترل مرکزی (TCP)، هزینه لوازم داخل مزرعه (TC<sub>F</sub>)، هزینه نصب و اجرای سیستم داخل مزرعه و ایستگاه پمپاژ (TC<sub>I</sub>) و هزینه کل (TC<sub>T</sub>).

### مرحله اول: جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز و به‌روزرسانی هزینه تمام‌شده پروژه‌ها

در این پژوهش از آمار و اطلاعات ۱۰۰ سامانه آبیاری قطره‌ای اجراشده بین سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۸ در نقاط مختلف کشور استفاده گردید. برای هر سامانه، آمار و اطلاعات مورد استفاده از دفترچه‌های طرح، نقشه‌های اتوکد و فایل اکسل مربوط به محاسبات طراحی استخراج و هزینه سامانه‌ها به دو بخش کلی دسته‌بندی شد: هزینه ایستگاه پمپاژ و هزینه مزرعه. انواع متغیرهای کاندیدا برای ورودی مدل برآورد هزینه‌های سامانه

خورشیدی، اشمیت و همکاران (Schmidt *et al.*, 2016) در ادغام داده‌های راداری نوری و باند X برای تخمین زیست‌توده مرتع در جنگل، رامپون و والانتیه (Rampone & Valente, 2017) در پیش‌بینی دمای فصلی، و مطالعات ون و همکاران (Wen *et al.*, 2018)، گومز و همکاران (Gomes *et al.*, 2019)، نونیس و همکاران (Nonis *et al.*, 2020) و آمَن و همکاران (Amen *et al.*, 2020). اهمیت مدل‌سازی از آن روست که بهترین مدل‌ها شناسایی می‌شوند تا ساده‌ترین مدل، که شامل برترین ویژگی‌ها نیز هست، به کار گرفته شود. مدل هر چه ساده‌تر و اصل خست در آن رعایت شده باشد، یعنی ورودی‌های آن کمتر باشد، آن مدل بهتر است (Saltelli *et al.*, 2019; Weber *et al.*, 2018).

یکی از مهم‌ترین نیازهای وزارت جهاد کشاورزی، وزارت نیرو و سایر متولیان صنعت آب و همچنین کارفرمایان، مشاوران و پیمانکاران، پیش‌بینی هزینه‌های پروژه‌ها در مرحله اولیه طراحی است. از آنجا که توسعه سامانه‌های مختلف آبیاری تحت فشار جزء سیاست‌های راهبردی وزارت جهاد کشاورزی است، داشتن دانش، اطلاعات و پیش‌آگاهی از هزینه سامانه آبیاری در مناطق مختلف و قبل از اجرا، کمک شایانی به مدیریت هزینه خواهد کرد. با توجه به وسعت قابل توجه زمین‌های زیر پوشش آبیاری تحت فشار و همچنین پتانسیل توسعه آن در کشور، این مدل‌سازی هزینه در بودجه‌بندی سالانه کشور نقش بسزایی خواهد داشت و توجه به آن از اهم امور است. نداشتن آگاهی کامل از هزینه تمام‌شده پروژه در ابتدای کار، وجه اجتناب‌ناپذیر بیشتر پروژه‌های توسعه و ساختمانی است، به گونه‌ای که زبده‌ترین مجریان و پیمانکاران نیز در این زمینه با مشکلاتی روبه‌رو هستند. این‌گونه تخمین‌ها به مالکان و

هزینه سالانه سرمایه تبدیل شود. علاوه بر این، به دلیل اینکه تمام هزینه‌ها به زمان وابسته هستند، این تبدیل همچنین ارزش زمانی فعلی هزینه‌های سرمایه‌گذاری شده در سال‌های قبل را نشان می‌دهد. در پژوهش حاضر با استفاده از تورم سالانه (به صورت پله‌ای)، قیمت سال‌های پیشین به سال پایه تبدیل و هزینه‌ها به‌روز رسانی شد (Park, 2012):

$$X_t = X_0(1 + r)^n \quad (1)$$

که در آن،

$X_t$  = ارزش فعلی سرمایه؛  $X_0$  = ارزش پایه سرمایه (ارزش سرمایه‌گذاری در سال احداث سامانه)؛  $r$  = متوسط نرخ بهره بانکی سالانه؛ و  $n$  = تعداد سال از سال احداث سامانه تا کنون است. پس از استخراج متغیرهای مؤثر بر هزینه سامانه‌های آبیاری قطره‌ای، در گام بعد ویژگی‌های برتر با بیشترین تأثیر بر مقدار خروجی مدل (یعنی هزینه)، انتخاب شدند.

### مرحله دوم: انتخاب ویژگی‌های برتر

حساسیت مدل به هر پارامتر ورودی عبارت است از نسبت تغییر در پارامتر خروجی مدل به ازای تغییر در آن پارامتر در حالتی که سایر پارامترها ثابت نگه‌داشته شوند. در آنالیز حساسیت<sup>۱</sup> هر پارامتر ورودی، مقدار تغییر معادل  $\pm 25$  و  $\pm 50$  درصد در نظر گرفته می‌شود تا شرایط لازم تحلیل حساسیت را فراهم آورد و حداکثر محدوده ممکن خطاها را در پارامترهای ورودی پوشش داده باشد. خروجی‌های مدل در وضعیت اولیه (بدون تغییر داده‌ها) خروجی مبنا در نظر گرفته می‌شوند. با تغییر هر یک از پارامترهای ورودی و ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترها، تأثیر آن بر پارامتر خروجی ارزیابی می‌شود. برای کمی‌سازی میزان حساسیت هر پارامتر ورودی، از رابطه ۲ استفاده شد (Komkov et al., 1986; Saltelli et al., 2008):

آبیاری قطره‌ای مشتمل‌اند بر متغیرهای هندسی زمین، متغیرهای مربوط به خاک، متغیرهای مربوط به منبع آبی، متغیرهای مربوط به گیاه و اقلیم، متغیرهای مدیریت آبیاری و متغیرهای هیدرولیکی. این متغیرها به این شرح استخراج شدند: اطلاعات عمومی طرح (استان، شهرستان، مالک، نوع محصول، نوع منبع آب، نوع انرژی و سال اجرا)، اطلاعات مربوط به منبع آبی (میزان و وضعیت حقاچه، هدایت الکتریکی، اسیدیته، سدیم، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، کربنات و بی‌کربنات)، اطلاعات مربوط به گیاه (فاصله ردیف‌های درختان، فاصله درختان روی هر ردیف، حداکثر تبخیر-تعرق روزانه گیاه، سطح سایه‌انداز و عمق توسعه ریشه)، اطلاعات مربوط به خاک (ظرفیت نگهداری آب در خاک، درصد تخلیه مجاز رطوبتی، درصد سطح خیس شده، نفوذپذیری نهایی و وزن مخصوص ظاهری)، اطلاعات مربوط به سامانه آبیاری (دبی متوسط کارکرد، فشار متوسط کارکرد، نوع آرایش لترال‌ها، تعداد گسیلنده برای هر گیاه و فاصله گسیلنده)، اطلاعات مربوط به مدیریت آبیاری مزرعه (دور آبیاری طراحی، نیاز خالص آبیاری، نیاز ناخالص آبیاری، مدت آبیاری، حداکثر ساعات آبیاری در یک شبانه‌روز، حداکثر تعداد نوبت آبیاری در هر دور، تعداد نوبت آبیاری، مساحت متوسط هر واحد آبیاری و دبی متوسط هر واحد آبیاری)، اطلاعات مربوط به ویژگی‌های مزرعه‌ای (شکل هندسی زمین، شیب متوسط، اختلاف ارتفاع منبع آبی تا بلندترین نقطه زمین، طول لترال‌ها، قطر و طول لوله‌های اصلی، نیمه اصلی و مانیفولدها و اتصالات)، اطلاعات ایستگاه پمپاژ (نوع پمپ، توان موتور، ارتفاع پمپاژ، دبی پمپاژ، اتصالات و لوازم سیستم کنترل مرکزی).

در بحث ارزش فعلی سرمایه در علم اقتصاد، باید مبلغ کل هزینه‌ها مشخص شود که آیا کشاورز با سرمایه‌گذاری در جایی دیگر، و نه خرید یا احداث سامانه، آیا سود بیشتری خواهد برد؟ پس از آن به

لازم است گفته شود علامت منفی پارامتر شاخص حساسیت نشان می‌دهد که مقدار آن پارامتر در آنالیز حساسیت نسبت به حالت اولیه کمتر شده است و علامت مثبت نشان‌دهنده عکس این موضوع است (Douglas-Smith *et al.*, 2020; Qian & Mahdi, 2020). جدول ۱ متغیرهای کاندیدا را برای تعیین رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته نشان می‌دهد.

$$S = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{x_{ni} - x_{ci}}{x_{ci}} \right) \Delta \quad (2)$$

که در آن،  
 $N$  = تعداد نقاط برای یک پارامتر خروجی؛  
 $x_{ni}$  = مقدار جدید پارامتر خروجی در نقطه  $i$ ام به ازای تغییر در پارامتر ورودی؛  $x_{ci}$  = مقدار پارامتر خروجی در نقطه  $i$ ام در حالت اجرای کنترل شبیه‌سازی بدون تغییر در پارامتر ورودی؛ و  
 $\Delta$  = مقدار مطلق تغییر در پارامتر ورودی است.

جدول ۱- متغیرهای کاندیدا برای تعیین رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته و برآورد هزینه سامانه آبیاری قطره‌ای

Table 1- Candidate variables for determining the relationship between independent and dependent variables and estimating the cost of drip irrigation system

| توضیح<br>Description                                | نماد<br>Symbol         | توضیح<br>Description                              | نماد<br>Symbol           |
|---|------------------------|---|--------------------------|
| طول کل لترال  | L <sub>16mm</sub> (m)  | مساحت زمین  | A                        |
| طول لوله رابط یک                                    | L <sub>32mm</sub> (m)  | شکل زمین (نسبت محیط به مساحت)                     | P/A (1/m)                |
| طول لوله رابط دو                                    | L <sub>40mm</sub> (m)  | تعداد قطعات زمین                                  | N <sub>PL</sub>          |
| طول لوله مانیفولد                                   | L <sub>50mm</sub> (m)  | فاصله منبع آبی تا زمین                            | D <sub>SF</sub> (m)      |
| طول لوله فرعی                                       | L <sub>63mm</sub> (m)  | اختلاف ارتفاع منبع آبی و زمین (بحرانی)            | $\Delta H_{SF}$ (m)      |
| طول لوله نیمه اصلی                                  | L <sub>75mm</sub> (m)  | مقدار کل دبی آب قابل دسترس                        | Q <sub>T</sub> (L/S)     |
| طول لوله اصلی                                       | L <sub>90mm</sub> (m)  | نسبت ساعتی در دور آبیاری که آب در اختیار مالک است | N <sub>HO</sub> (hour)   |
| طول لوله جانبی                                      | L <sub>110mm</sub> (m) | فاصله ردیف گیاهان                                 | S <sub>R</sub> (m)       |
| طول لوله جانبی                                      | L <sub>125mm</sub> (m) | فاصله گیاه روی هر ردیف                            | S <sub>P</sub> (m)       |
| طول لوله جانبی                                      | L <sub>160mm</sub> (m) | تبخیر-تعرق گیاه                                   | ET <sub>P</sub> (mm/day) |
| خط انتقال طولانی                                    | L <sub>200mm</sub> (m) | نفوذپذیری نهایی خاک                               | F <sub>SP</sub> (mm/hr)  |
| کیفیت آب از نظر نیاز به فیلتراسیون                  | W <sub>Q</sub>         | ظرفیت نگهداری آب در خاک (FC-PWP)                  | A <sub>W</sub> (mm/m)    |
| دبی سیستم   | Q <sub>S</sub> (l/s)   | سطح خیس شده                                       | W <sub>A</sub> (%)       |
| توان پمپ مورد نیاز                                  | P <sub>P</sub> (kw)    | دبی گسیلنده                                       | Q <sub>E</sub> (Lit/s)   |
| ارتفاع پمپاژ  | H <sub>P</sub> (m)     | تعداد کل گسیلنده                                  | N <sub>E</sub> (n)       |
| فاصله زمین تا خطوط برق                              | D <sub>FE</sub> (m)    | تعداد ساعات کاری در شبانه‌روز                     | T (h)                    |
| نوع منطقه یا شیب غالب (کوهستانی، دشت)               | S (%)                  | تعداد نوبت‌های آبیاری                             | N <sub>IT</sub> (n)      |
| هزینه ایستگاه پمپاژ و سیستم کنترل مرکزی (ریال)      | TC <sub>P</sub> (Rial) | مساحت نوبت‌های آبیاری                             | A <sub>IT</sub> (ha)     |
| هزینه لوازم داخل مزرعه (ریال)                       | TC <sub>F</sub> (Rial) | تعداد واحدهای آبیاری                              | N <sub>IU</sub> (n)      |
| هزینه نصب و اجرای داخل مزرعه و ایستگاه پمپاژ (ریال) | TC <sub>I</sub> (Rial) | مساحت واحدهای آبیاری                              | A <sub>IU</sub> (ha)     |
| هزینه کل (ریال)                                     | TC <sub>T</sub> (Rial) | دور آبیاری  | F (day)                  |
|   |                        | تعداد واحدهای آبیاری که همزمان آبیاری می‌شوند     | N <sub>IUS</sub> (n)     |

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \times \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (۳)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \quad (۴)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - P_i| \quad (۵)$$

که در آنها؛

$O_i$  = مقادیر مشاهداتی؛  $P_i$  = مقادیر پیش‌بینی شده؛  
 $\bar{O}$  = میانگین مقادیر مشاهداتی؛  $\bar{P}$  = میانگین مقادیر  
 پیش‌بینی شده؛ و  $n$  = تعداد داده‌هاست.

هر مدل که  $R$  بیشتر و  $MSE$  و  $MAE$  کمتر داشته  
 باشد مطلوبیت بیشتری دارد.

## نتایج و بحث

### بررسی همبستگی بین متغیرها

نتایج همبستگی بین ۳۹ متغیر مستقل ذکر شده  
 با هزینه ایستگاه پمپاژ و سیستم کنترل مرکزی  
 $(TC_P)$ ، هزینه لوازم داخل مزرعه  $(TC_F)$ ، هزینه  
 نصب و اجرای داخل مزرعه و ایستگاه پمپاژ  $(TC_I)$  و  
 هزینه کل  $(TC_T)$  در جدول (۲) ارائه شده است.  
 بیشترین ضریب همبستگی ( $R$ ) مثبت بین  
 پارامترهای  $Q_S$  (دبی سیستم)،  $P_P$  (توان پمپ مورد  
 نیاز) و  $H_P$  (ارتفاع پمپاژ) با  $TC_P$  به ترتیب با مقدار  
 ۰/۶۱۸، ۰/۷۶۶ و ۰/۶۶۶ به دست آمد و هر سه در  
 سطح یک درصد دارای اختلاف معنی داری هستند.  
 از آنجایی که عمده هزینه بخش ایستگاه پمپاژ و  
 سیستم کنترل مرکزی مربوط به تجهیزات ایستگاه  
 پمپاژ است، سه متغیر مذکور بیشترین همبستگی را  
 با  $TC_P$  دارند و مهم‌ترین پارامترهای این بخش به  
 حساب می‌آیند و با افزایش دبی سیستم، توان پمپ  
 و ارتفاع پمپاژ، هزینه نهایی ایستگاه پمپاژ و سیستم  
 کنترل مرکزی افزایش می‌یابد.

## مرحله سوم: آموزش و اعتبارسنجی مدل بر آورد هزینه

در این پژوهش، از نرم‌افزار Eureqa Formulize  
 برای برآورد هزینه سامانه‌های آبیاری قطره‌ای  
 استفاده شد. این نرم‌افزار به‌طور خودکار  
 پیش‌پردازش داده‌ها مانند نرمال‌سازی، حذف  
 داده‌های پرت و تصادفی کردن داده‌ها را به‌کار  
 می‌بندد و بدین طریق خطای محاسباتی را به دلیل  
 نبود نویز در داده‌ها به حداقل می‌رساند. نرم‌افزار  
 Eureqa Formulize با نام اختصاری Eureqa در  
 سال ۲۰۰۹ در دانشگاه کرنل<sup>۱</sup> آمریکا ساخته و عرضه  
 شده است. این برنامه را بعداً شرکت Nutonian  
 طراحی و توسعه داد که با بهره‌گیری از الگوریتم‌های  
 تکاملی<sup>۲</sup> که معروف‌ترین آن الگوریتم ژنتیک (GA) و  
 زیربخش برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) است، روابط بین  
 پارامترها را کشف و مدل‌سازی می‌کند. این برنامه در  
 نهایت به صورت رگرسیون نمادین با ارائه مجموعه‌ای  
 از روابط ریاضی، معادله نهایی را در اختیار کاربر قرار  
 می‌دهد که کاربر می‌تواند بنا به نیاز و فعالیت خود  
 هریک را انتخاب کند و با ارائه خروجی‌های مختلف،  
 آنالیز مدل ارائه شده را برای کاربر ساده می‌کند. پس  
 از پیش‌پردازش داده‌ها، ۷۰ درصد از داده‌ها به عنوان  
 داده‌های آموزش<sup>۳</sup> و ۳۰ درصد به عنوان داده‌های  
 آزمایش<sup>۴</sup> یا آزمون در نظر گرفته شد (Schmidt &  
 Lipson, 2009).

### معیارهای ارزیابی

برای ارزیابی مدل‌ها و مقایسه نتایج روش‌های  
 مختلف، از سه معیار ارزیابی یعنی ضریب  
 همبستگی<sup>۵</sup> ( $R$ )، خطای میانگین مربعات<sup>۶</sup> ( $MSE$ ) و  
 میانگین قدر مطلق خطا<sup>۷</sup> ( $MAE$ ) استفاده شد  
 (Moriasi et al., 2007):

1- Cornell University  
 3- Training Data  
 5- Correlation Coefficient  
 7- Mean Absolute Error

2- Evolutionary Algorithms  
 4- Testing Data  
 6- Mean Squared Error



افزایش می‌یابد و به عبارتی این متغیرها نماینده ۳۹ متغیر مورد مطالعه برای بررسی پیوند بین این پارامترها با هزینه نهایی لوازم داخل مزرعه (TC<sub>F</sub>) هستند.

البته متغیرهای  $L_{75mm}$ ,  $L_{63mm}$ ,  $N_{IT}$ ,  $D_{SF}$ ,  $N_{PL}$  و  $L_{90mm}$  ضریب همبستگی بالایی از خود نشان دادند که همگی آنها در سطح اطمینان یک درصد معنی‌دار شده‌اند (جدول ۲).

سه پارامتر دارای بیشترین همبستگی با هزینه عبارت‌اند از A (مساحت زمین)،  $N_E$  (تعداد کل گسیلنده) و  $L_{16mm}$  (طول کل لترال) که ضریب همبستگی آنها به ترتیب برابر با ۰/۵۵۰، ۰/۶۳۱ و ۰/۶۳۸ است. با توجه به آماره P-value، همگی این متغیرها در سطح اطمینان یک درصد معنی‌دارند. با افزایش مساحت و بالطبع افزایش تعداد کل گسیلنده و لوله‌های آبده، هزینه نهایی لوازم داخل مزرعه

جدول ۲- نتایج ضریب همبستگی و معنی‌داری (P-value) متغیرهای مستقل با متغیر وابسته

Table 2- Results of correlation coefficient and significance (P-value) of independent variables with dependent variable

| TC <sub>T</sub>     |                | TC <sub>I</sub>     |                | TC <sub>F</sub>     |                | TC <sub>P</sub>     |                | پارامتر                  |
|---------------------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|--------------------------|
| P-value             | R <sup>2</sup> | P-value             | R <sup>2</sup> | P-value             | R <sup>2</sup> | P-value             | R <sup>2</sup> |                          |
| 0.000 **            | 0.400          | 0.158 <sup>ns</sup> | 0.142          | 0.000 **            | 0.550          | 0.002 **            | 0.301          | A                        |
| 0.035 *             | -0.211         | 0.790 <sup>ns</sup> | -0.027         | 0.054 <sup>ns</sup> | -0.193         | 0.002 **            | -0.304         | P/A (1/m)                |
| 0.262 <sup>ns</sup> | 0.113          | 0.706 <sup>ns</sup> | 0.038          | 0.001 **            | 0.330          | 0.743 <sup>ns</sup> | -0.033         | N <sub>PL</sub>          |
| 0.097 <sup>ns</sup> | 0.167          | 0.243 <sup>ns</sup> | 0.118          | 0.000 **            | 0.452          | 0.220 <sup>ns</sup> | -0.124         | D <sub>SF</sub> (m)      |
| 0.001 **            | 0.336          | 0.003 **            | 0.294          | 0.586 <sup>ns</sup> | 0.055          | 0.010*              | 0.257          | ΔH <sub>SF</sub> (m)     |
| 0.766 <sup>ns</sup> | -0.030         | 0.563 <sup>ns</sup> | 0.059          | 0.679 <sup>ns</sup> | -0.042         | 0.184 <sup>ns</sup> | -0.134         | Q <sub>T</sub> (L/S)     |
| 0.356 <sup>ns</sup> | 0.093          | 0.887 <sup>ns</sup> | 0.014          | 0.312 <sup>ns</sup> | -0.102         | 0.009**             | 0.261          | N <sub>HO</sub> (hour)   |
| 0.001 **            | 0.322          | 0.000 **            | 0.355          | 0.543 <sup>ns</sup> | -0.062         | 0.039 *             | 0.207          | S <sub>R</sub> (m)       |
| 0.011 *             | 0.252          | 0.012 *             | 0.251          | 0.328 <sup>ns</sup> | -0.099         | 0.016 *             | 0.240          | S <sub>P</sub> (m)       |
| 0.000 **            | 0.368          | 0.005 **            | -0.282         | 0.753 <sup>ns</sup> | 0.032          | 0.000 **            | -0.409         | ET <sub>P</sub> (mm/day) |
| 0.783 <sup>ns</sup> | -0.028         | 0.957 <sup>ns</sup> | -0.005         | 0.885 <sup>ns</sup> | 0.015          | 0.519 <sup>ns</sup> | -0.065         | F <sub>SP</sub> (mm/hr)  |
| 0.962 <sup>ns</sup> | -0.005         | 0.912 <sup>ns</sup> | 0.011          | 0.649 <sup>ns</sup> | -0.046         | 0.976 <sup>ns</sup> | 0.003          | AW (mm/m)                |
| 0.000 **            | -0.454         | 0.000 **            | -0.478         | 0.244 <sup>ns</sup> | 0.118          | 0.000 **            | -0.350         | W <sub>A</sub> (%)       |
| 0.744 <sup>ns</sup> | 0.033          | 0.913 <sup>ns</sup> | 0.011          | 0.227 <sup>ns</sup> | 0.122          | 0.786 <sup>ns</sup> | -0.028         | Q <sub>E</sub> (Lit/s)   |
| 0.510 <sup>ns</sup> | 0.067          | 0.141 <sup>ns</sup> | -0.148         | 0.000 **            | 0.631          | 0.626 <sup>ns</sup> | -0.049         | N <sub>E</sub> (n)       |
| 0.828 <sup>ns</sup> | 0.022          | 0.458 <sup>ns</sup> | -0.075         | 0.914 <sup>ns</sup> | -0.011         | 0.075 <sup>ns</sup> | 0.179          | T (h)                    |
| 0.173 <sup>ns</sup> | 0.137          | 0.732 <sup>ns</sup> | 0.035          | 0.000 **            | 0.358          | 0.937 <sup>ns</sup> | 0.008          | N <sub>IT</sub> (n)      |
| 0.020 *             | 0.232          | 0.388 <sup>ns</sup> | 0.087          | 0.088 <sup>ns</sup> | 0.172          | 0.007 **            | 0.269          | A <sub>IT</sub> (ha)     |
| 0.191 <sup>ns</sup> | 0.132          | 0.657 <sup>ns</sup> | 0.045          | 0.000 **            | 0.520          | 0.183 <sup>ns</sup> | -0.134         | N <sub>IU</sub> (n)      |
| 0.250 <sup>ns</sup> | 0.116          | 0.905 <sup>ns</sup> | -0.012         | 0.783 <sup>ns</sup> | -0.028         | 0.002 **            | 0.304          | A <sub>IU</sub> (ha)     |
| 0.217 <sup>ns</sup> | 0.124          | 0.043 *             | 0.202          | 0.884 <sup>ns</sup> | -0.015         | 0.756 <sup>ns</sup> | -0.031         | F (day)                  |
| 0.450 <sup>ns</sup> | 0.076          | 0.542 <sup>ns</sup> | 0.062          | 0.009 **            | 0.259          | 0.296 <sup>ns</sup> | -0.106         | N <sub>IUS</sub> (n)     |
| 0.409 <sup>ns</sup> | 0.083          | 0.139 <sup>ns</sup> | -0.149         | 0.000 **            | 0.638          | 0.881 <sup>ns</sup> | -0.015         | L <sub>16mm</sub> (m)    |
| 0.362 <sup>ns</sup> | 0.092          | 0.228 <sup>ns</sup> | 0.122          | 0.392 <sup>ns</sup> | -0.086         | 0.457 <sup>ns</sup> | 0.075          | L <sub>32mm</sub> (m)    |
| 0.007 **            | 0.266          | 0.001 **            | 0.335          | 0.293 <sup>ns</sup> | -0.106         | 0.156 <sup>ns</sup> | 0.143          | L <sub>40mm</sub> (m)    |
| 0.299 <sup>ns</sup> | 0.105          | 0.198 <sup>ns</sup> | 0.130          | 0.458 <sup>ns</sup> | 0.075          | 0.831 <sup>ns</sup> | -0.022         | L <sub>50mm</sub> (m)    |
| 0.279 <sup>ns</sup> | 0.109          | 0.706 <sup>ns</sup> | -0.038         | 0.000 **            | 0.362          | 0.564 <sup>ns</sup> | 0.058          | L <sub>63mm</sub> (m)    |
| 0.471 <sup>ns</sup> | -0.073         | 0.040 *             | -0.205         | 0.001 **            | 0.328          | 0.521 <sup>ns</sup> | -0.065         | L <sub>75mm</sub> (m)    |

ادامه جدول ۲- نتایج ضریب همبستگی و معنی‌داری (P-value) متغیرهای مستقل با متغیر وابسته

Table 2- Results of correlation coefficient and significance (P-value) of independent variables with dependent variable

| TC <sub>T</sub>     |                | TC <sub>I</sub>     |                | TC <sub>F</sub>     |                | TC <sub>P</sub>     |                | پارامتر                |
|---------------------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|------------------------|
| P-value             | R <sup>2</sup> | P-value             | R <sup>2</sup> | P-value             | R <sup>2</sup> | P-value             | R <sup>2</sup> |                        |
| 0.029 *             | 0.218          | 0.173 <sup>ns</sup> | 0.137          | 0.000 **            | 0.464          | 0.643 <sup>ns</sup> | -0.047         | L <sub>90mm</sub> (m)  |
| 0.349 <sup>ns</sup> | -0.095         | 0.448 <sup>ns</sup> | -0.077         | 0.057 <sup>ns</sup> | 0.191          | 0.024 *             | -0.226         | L <sub>110mm</sub> (m) |
| 0.347 <sup>ns</sup> | -0.095         | 0.678 <sup>ns</sup> | -0.042         | 0.083 <sup>ns</sup> | 0.174          | 0.006 **            | -0.271         | L <sub>125mm</sub> (m) |
| 0.335 <sup>ns</sup> | -0.097         | ۰/۵۶۴ <sup>ns</sup> | -0.058         | 0.368 <sup>ns</sup> | 0.091          | 0.055 <sup>ns</sup> | -0.192         | L <sub>160mm</sub> (m) |
| 0.313 <sup>ns</sup> | 0.247          | 0.013 *             | -0.247         | 0.607 <sup>ns</sup> | 0.052          | 0.202 <sup>ns</sup> | 0.129          | L <sub>200mm</sub> (m) |
| 0.083 <sup>ns</sup> | -0.174         | 0.093 <sup>ns</sup> | -0.169         | 0.388 <sup>ns</sup> | -0.087         | 0.516 <sup>ns</sup> | -0.066         | W <sub>Q</sub>         |
| 0.004 **            | 0.287          | 0.834 <sup>ns</sup> | 0.021          | 0.950 <sup>ns</sup> | 0.006          | 0.000 **            | 0.618          | Q <sub>S</sub> (l/s)   |
| 0.000 **            | 0.428          | 0.125 <sup>ns</sup> | 0.154          | 0.597 <sup>ns</sup> | -0.054         | 0.000 **            | 0.766          | P <sub>P</sub> (kw)    |
| 0.000 **            | 0.429          | 0.007 **            | 0.269          | 0.090 <sup>ns</sup> | -0.171         | 0.000 **            | 0.666          | H <sub>P</sub> (m)     |
| 0.029 *             | 0.218          | 0.573 <sup>ns</sup> | 0.057          | 0.088 <sup>ns</sup> | 0.171          | 0.004 **            | 0.287          | D <sub>FE</sub> (m)    |
| 0.027 *             | 0.222          | 0.008 **            | 0.264          | 0.961 <sup>ns</sup> | -0.005         | 0.402 <sup>ns</sup> | 0.085          | S (%)                  |

نشانه های \* و \*\* به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و<sup>ns</sup> نبود تفاوت معنی‌دار است.

در سطح اطمینان یک درصد معنی‌دار هستند (جدول ۲).

پارامترهای A (مساحت زمین)، P<sub>P</sub> (توان پمپ مورد نیاز) و H<sub>P</sub> (ارتفاع پمپاژ) به ترتیب با ضریب همبستگی ۰/۴۰۰، ۰/۴۲۸ و ۰/۴۲۹ بیشترین همبستگی را با هزینه کل (TC<sub>T</sub>) دارند. سه مورد از متغیرهایی که ضریب همبستگی منفی و به عبارتی رابطه عکس با TC<sub>T</sub> دارند، متغیرهایی هستند که در بخش TC<sub>P</sub> و TC<sub>I</sub> تکرار شده‌اند و مشتمل‌اند بر P/A (شکل زمین، نسبت محیط به مساحت)، ET<sub>P</sub> (تبخیر-تغرق گیاه) و W<sub>A</sub> (سطح خیس شده) به ترتیب با ضریب همبستگی ۰/۲۱۱، ۰/۳۶۸ و ۰/۴۵۴- که هر سه در سطح یک درصد دارای اختلاف معنی‌داری هستند (جدول ۲). به طور کلی نتایج همبستگی را می‌توان به این صورت جمع‌بندی کرد: ۱۲ متغیر با سطح معنی‌داری یک درصد، چهار متغیر با سطح معنی‌داری پنج درصد و ۲۳ متغیر با نبود تفاوت معنی‌دار با هزینه ایستگاه پمپاژ و سیستم کنترل مرکزی (TC<sub>P</sub>). این موضوع برای

در بخش هزینه نصب و اجرای سامانه داخل مزرعه و ایستگاه پمپاژ (TC<sub>I</sub>)، متغیرهای ΔH<sub>SF</sub> (اختلاف ارتفاع منبع آبی و زمین در بحرانی‌ترین حالت)، S<sub>R</sub> (فاصله ردیف گیاهان) و L<sub>40mm</sub> (طول لوله رابط دو) به ترتیب با مقدار ۰/۲۹۴، ۰/۳۵۵ و ۰/۳۳۵ دارای بیشترین ضریب همبستگی و در سطح اطمینان یک درصد معنی‌دار هستند (جدول ۲). دلیل کاهش مقدار عددی ضریب همبستگی در بخش TC<sub>I</sub> نسبت به بخش‌های دیگر هزینه آن است که همه متغیرها، به‌گونه‌ای تأثیر مستقیم خود را بر TC<sub>P</sub> و TC<sub>F</sub> گذاشته‌اند و اکنون چون تأثیر غیرمستقیم خود را بر متغیر وابسته TC<sub>I</sub> می‌گذارند، مقدار عددی ضریب همبستگی نسبت به دو بخش قبل کاهش یافته است. بیشترین مقدار ضریب همبستگی منفی که رابطه عکس بین متغیرها و TC<sub>I</sub> را نشان می‌دهد، مربوط به متغیرهای ET<sub>P</sub> (تبخیر-تغرق گیاه)، W<sub>A</sub> (سطح خیس شده) و L<sub>200mm</sub> (خط انتقال طولانی) به ترتیب برابر با ۰/۲۸۲، ۰/۴۷۸ و ۰/۲۴۷- است که هر سه متغیر

مدل‌هایی با پیچیدگی کمتر از ۲۲ انتخاب کرد که نتایج خوبی در بخش  $TC_P$  به دست می‌دهند. بهترین مدل برای برآورد هزینه ایستگاه پمپاژ و سیستم کنترل مرکزی یک سامانه آبیاری قطره‌ای به صورت  $TC_P = a + b*(L32mm (m)) + c*\sqrt{PP (kW)} - d*(WA (%)) - e*\text{xor}(f, (DFE (m)))$  است.

در بخش هزینه لوازم داخل مزرعه ( $TC_F$ )، بهترین مدل زمانی به دست آمده که پیچیدگی مدل‌سازی برابر ۱۳ است و با ضریب همبستگی ( $R$ ) و میانگین قدر مطلق خطا ( $MAE$ ) به ترتیب برابر با ۰/۸۴۸ و ۲۱۱۹۸۲۵۷ ریال بهترین مقدار را در بین ۶ مدل به دست آمده در بخش  $TC_F$  دارد. لازم است گفته شود که مدل‌های با پیچیدگی ۱۱ و ۷ نیز دقت بالایی دارند و پارامترهای آماری  $MAE$ ،  $R$  و  $MSE$  نیز بیانگر این ادعاست. بنابراین اگر قرار بر معرفی یک مدل برای برآورد هزینه لوازم داخل مزرعه یک سامانه آبیاری قطره‌ای باشد، می‌توان مدل  $TC_F = a + A + b*(DSF (m)) + c*A*(L16mm (m))$  را معرفی کرد. در بخش هزینه نصب و اجرای داخل مزرعه و ایستگاه پمپاژ ( $TC_I$ )، مدلی که بهترین همبستگی و کمترین خطا را داشت، مدلی بود که از پیچیدگی ۱۱ به دست آمد و جالب توجه این است که در این بخش حتی پیچیدگی ۱۵ و ۲۱ هم وجود دارد. البته تفاوت دقت مدل‌سازی بین حالت پیچیدگی ۷ و ۹ با ۱۱ با ۱۵ و ۲۱ زیاد چشم‌گیر نیست. مدلی که برای برآورد هزینه نصب و اجرای داخل مزرعه و ایستگاه پمپاژ سامانه آبیاری قطره‌ای توصیه می‌شود، مدل  $TC_I = a + b*(F (day))*(L40mm (m)) - c*(WA (%))$  با ضریب همبستگی ( $R$ ) برابر با ۰/۷۷۰ و میانگین قدر مطلق خطا ( $MAE$ ) برابر با ۴۵۴۸۳۹۹۶ ریال است.

دیگر بخش‌ها بدین شرح است که در بخش هزینه لوازم داخل مزرعه ( $TC_F$ )، ۱۱ متغیر در سطح معنی‌داری یک درصد و ۲۸ متغیر با نبود تفاوت معنی‌دار؛ در بخش هزینه نصب و اجرای داخل مزرعه و ایستگاه پمپاژ ( $TC_I$ )، ۷ متغیر در سطح معنی‌داری یک درصد، ۴ متغیر در سطح معنی‌داری پنج درصد و ۲۸ متغیر با نبود تفاوت معنی‌دار؛ و در نهایت در بخش هزینه کل ( $TC_T$ )، ۹ متغیر در سطح معنی‌داری یک درصد، ۶ متغیر در سطح معنی‌داری پنج درصد و ۲۴ متغیر با نبود تفاوت معنی‌دار به ثبت رسیده‌اند (جدول ۲).

### استخراج روابط بین متغیرها

نتایج مدل‌سازی اقتصادی بخش‌های مختلف هزینه سامانه آبیاری گویای آن است که هر چه پیچیدگی مدل بیشتر باشد، نتایج قابل قبول‌تری به دست می‌آید (جدول ۳). در بخش هزینه ایستگاه پمپاژ و سیستم کنترل مرکزی ( $TC_P$ )، مدلی که بیشترین پیچیدگی یعنی ۲۲ را داشت، بهترین عملکرد را از نظر شاخص‌های آماری دارد. مقدار ضریب همبستگی ( $R$ ) در این مدل بالاترین مقدار را بین دیگر مدل‌های برآوردی داشته (۰/۴۴۹) و خطای میانگین مربعات ( $MSE$ ) با مقدار ۲۷۲۳۶۳۳۳ ریال و میانگین قدر مطلق خطا ( $MAE$ ) نیز حداقل مقدار خود را داشتند. البته بین مدل‌های با پیچیدگی ۷ تا ۲۱ که چهار مدل هستند، تفاوت چندانی از نظر دقت و عملکرد با مدل برتر وجود ندارد. به عبارتی، با تغییر از حالت پیچیدگی ۱ به ۳ و یا به ۵، خطای مدل‌سازی کمتر می‌شود و دقت تخمین بالاتر می‌رود اما زمانی که پیچیدگی‌ها از ۷ بیشتر شود، درصد کاهش خطا و افزایش دقت مدل شیب کمتری دارد و می‌توان

جدول ۳- نتایج مدل‌سازی اقتصادی بخش‌های مختلف هزینه سامانه آبیاری قطره‌ای

Table 3- Results of economic modeling of different parts of the cost of drip irrigation system

| پارامتر آماری       |          |       | مدل‌های به دست آمده  | پیچیدگی    | بخش   |
|---------------------|----------|-------|--|------------|---|
| Evaluation criteria |          |       |  |            |   |
| MSE                 | MAE      | R     | Obtained models  | Complexity | Part  |
| 1.9372e15           | 27236333 | 0.449 | $TC_P = a + b*(L32mm (m)) + c*\sqrt{(PP (kw))} - d*(WA (\%)) - e*\text{xor}(f, (DFE (m)))$ | 22         | هزینه ایستگاه پمپاژ و سیستم کنترل مرکزی<br>Cost of pumping station and central control system (TC <sub>P</sub> )                    |
| 2.09348e15          | 28931346 | 0.319 | $TC_P = a + b*(DFE (m)) + c*(L32mm (m)) + d*\sqrt{(PP (kw))} - e*(WA (\%))$                | 21         |   |
| 1.96859e15          | 30538769 | 0.318 | $TC_P = a + b*(PP (kw)) + c*(L32mm (m)) - d*(WA (\%))$                                     | 13         |   |
| 2.55872e15          | 35522290 | 0.328 | $TC_P = a + b*(PP (kw)) - c*(WA (\%))$   | 9          |   |
| 1.52049e15          | 30878553 | 0.376 | $TC_P = a + b*(PP (kw)) - c*(WA (\%))$   | 7          |   |
| 3.57204e15          | 45579020 | 0.200 | $TC_P = a + b*(PP (kw))$   | 5          |   |
| 1.49747e15          | 25765997 | 0.124 | $TC_P = a + b*A$   | 3          |   |
| 1.15856e15          | 27236333 | 0     | $TC_P = a$   | 1          |   |
| 7.27949e14          | 21198257 | 0.848 | $TC_F = a + A + b*(DSF (m)) + c*A*(L16mm (m))$   | 13         | هزینه لوازم داخل مزرعه<br>Cost of on-farm equipment (TC <sub>F</sub> )  |
| 7.68059e14          | 21442189 | 0.849 | $TC_F = a + b*(DSF (m)) + c*A*(L16mm (m))$   | 11         |   |
| 7.29798e14          | 22797586 | 0.837 | $TC_F = a + b*A*(L16mm (m))$   | 7          |   |
| 1.02543e15          | 26529631 | 0.764 | $TC_F = a + b*(NE (n))$  | 5          |   |
| 1.9709e15           | 31709534 | 0.764 | $TC_F = a*(NE (n))$  | 3          |   |
| 2.4518e15           | 41982187 | 0     | $TC_F = a$   | 1          |   |
| 6.59292e15          | 44255402 | 0.494 | $TC_I = a + b*(L40mm (m)) + c*(QT (L/S))*(L32mm (m)) + d*(SR (m))^2 - e*(ETP (mm/day))$    | 21         | هزینه نصب و اجرای داخل مزرعه و ایستگاه پمپاژ<br>Cost of installation and performance on-farm and pumping station (TC <sub>I</sub> ) |
| 6.20094e15          | 51403144 | 0.529 | $TC_I = a + b*(L40mm (m)) + c*(QT (L/S))*(L32mm (m)) - d*(ETP (mm/day))$                   | 15         |   |
| 3.6007e15           | 45483996 | 0.770 | $TC_I = a + b*(F (day))*(L40mm (m)) - c*(WA (\%))$   | 11         |   |
| 7.62029e15          | 53750421 | 0.335 | $TC_I = a + b*(SR (m)) - c*(ETP (mm/day))$   | 9          |   |
| 7.1555e15           | 60096707 | 0.458 | $TC_I = a - b*(ETP (mm/day))*(WA (\%))$  | 7          |   |
| 6.63756e15          | 51328915 | 0.491 | $TC_I = a - b*(WA (\%))$   | 5          |   |
| 8.12169e15          | 55060897 | 0.326 | $TC_I = a*(SR (m))$  | 3          |   |
| 8.48927e15          | 66118323 | 0     | $TC_I = a$   | 1          |   |
| 9.72272e15          | 77240845 | 0.743 | $TC_T = 275379820*A + 19642999*(\Delta HSF (m)) + 1822153*(SR (m))*(F (day))*(Qs (kw))$    | 15         | هزینه کل<br>Total cost (TC <sub>T</sub> )   |
| 2.08699e16          | 92929371 | 0.261 | $TC_T = 19643005 + a*A + 1822153*(SR (m))*(F (day))*(Qs (kw))$                             | 13         |   |
| 2.13285e16          | 95185910 | 0.262 | $TC_T = a*A + b*(SR (m))*(F (day))*(Qs (kw))$  | 11         |   |
| 2.2685e16           | 85286845 | 0.266 | $TC_T = a*A + 4751646*(SR (m))*(Qs (kw))$  | 9          |   |
| 1.83116e16          | 91328778 | 0.245 | $TC_T = a + b*(SR (m))*(PP (kw))$  | 7          |   |
| 2.35725e16          | 96087925 | 0.207 | $TC_T = a*A$   | 3          |   |
| 1.78791e16          | 96766160 | 0     | $TC_T = a$   | 1          |   |

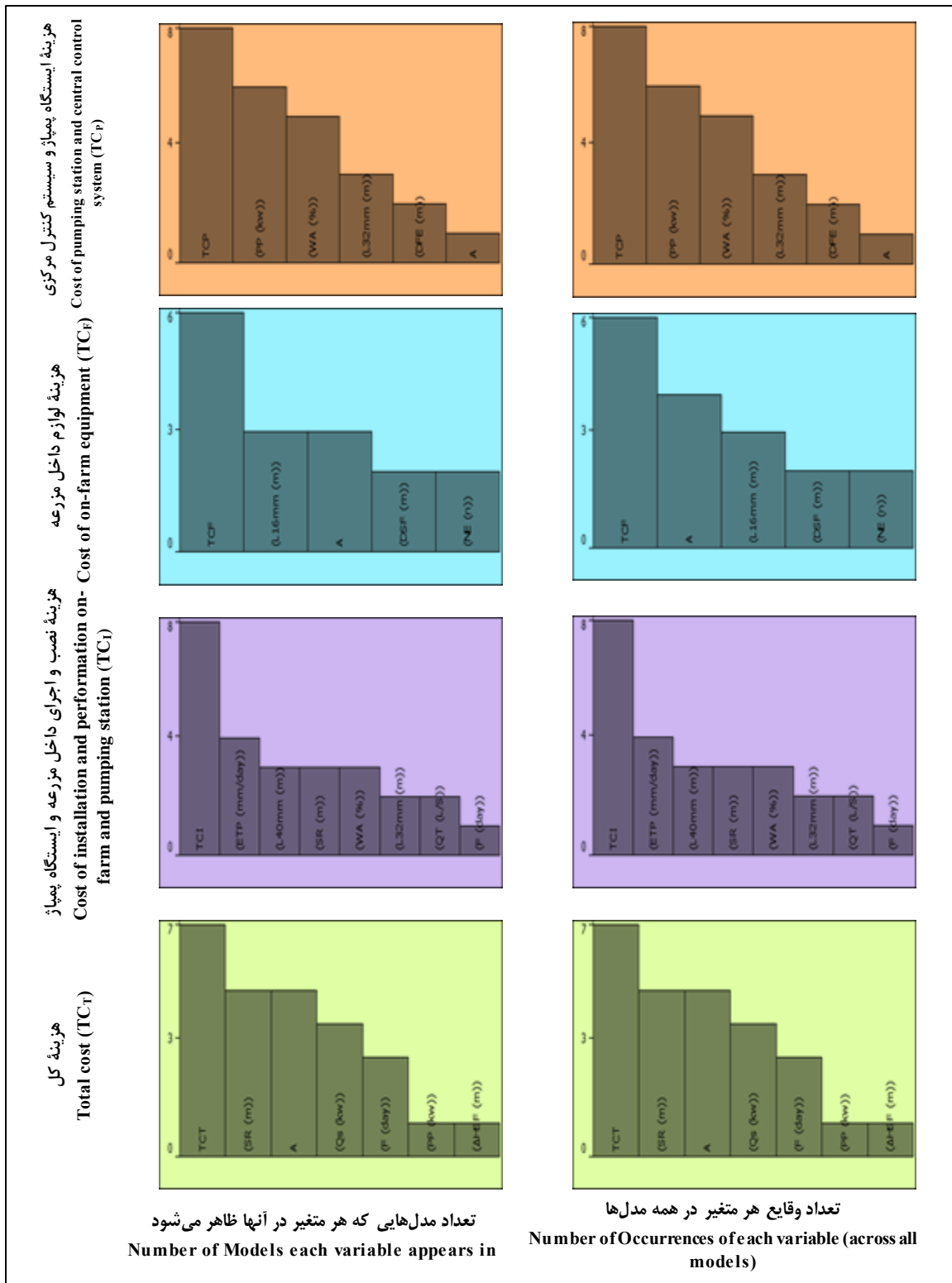
تکرار شده است زیرا در رابطه اول (با توجه به جدول ۲) می‌توان مشاهده کرد که این متغیر دو بار در یک مدل قرار گرفته است. به طور کلی، در بخش  $TC_P$  متغیر توان پمپ مورد نیاز ( $P_P$  (kW)) و سطح خیس‌شده ( $W_A$  (%))، در بخش  $TC_F$  متغیر لوله آبدده ( $L_{16mm}$  (m)) و مساحت ( $A$ )، در بخش  $TC_I$  متغیر تبخیر-تعرق ( $ET_P$  (mm/day)) و در نهایت در بخش  $TC_T$  متغیر فاصله ردیف گیاهان ( $S_R$  (m)) و مساحت ( $A$ ) از پر تکرارترین متغیرها هستند و بیشترین تأثیر را بر هزینه دارند (شکل ۱).

#### رابطه بین پیچیدگی مدل‌ها و خطا

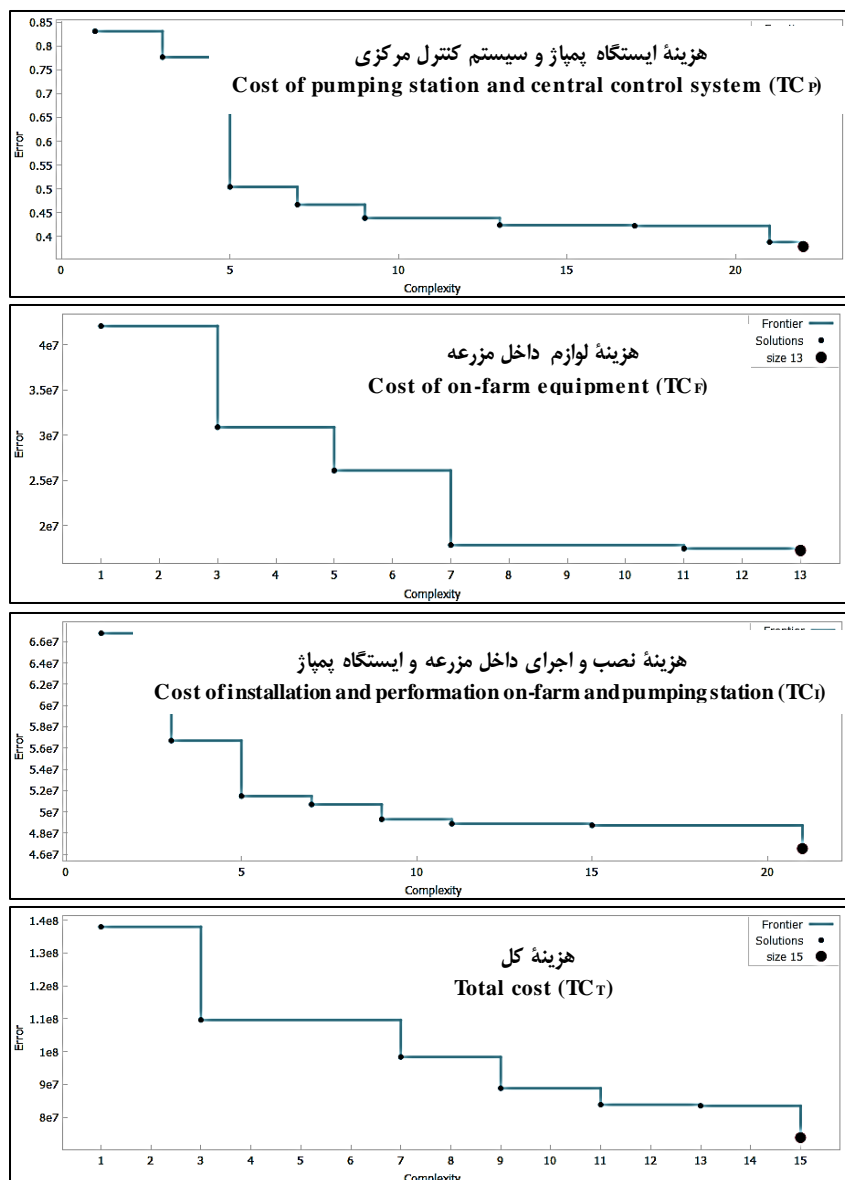
هرچه تعداد متغیرهای مستقل ورودی مدل بیشتر باشد، مدل طبیعتاً پیچیده‌تر است و دقت بیشتری دارد. به منظور کاهش پیچیدگی باید از بین متغیرها بهترین و تأثیرگذارترین آنها انتخاب شود. به همین دلیل و با توجه به جدول ۲ و شکل ۲، پیچیدگی هزینه ایستگاه پمپاژ و سیستم کنترل مرکزی ( $TC_P$ ) برابر ۲۲، هزینه لوازم داخل مزرعه ( $TC_F$ ) برابر ۱۳، هزینه نصب و اجرای داخل مزرعه و ایستگاه پمپاژ ( $TC_I$ ) برابر ۲۱ و هزینه کل ( $TC_T$ ) برابر ۱۵ انتخاب شد. دقت برآورد مدل در جهش‌های مختلف پیچیدگی متفاوت است. برای مثال، از پیچیدگی ۳ به پیچیدگی ۵ در بخش  $TC_T$  شکل ۲، خطای مدل کمتر و دقت آن بیشتر شده است اما با افزایش پیچیدگی از ۱۰ به ۲۰ دیده می‌شود که خطای مدل کاهش چندانی نمی‌یابد. بنابراین با توجه شکل ۲ می‌توان مدل‌های ساده‌تر اما کاراتر و دقیق‌تر را در هر بخش انتخاب کرد.

هزینه کل ( $TC_T$ ) یا حاصل جمع هزینه سه بخش  $TC_P$ ،  $TC_F$  و  $TC_I$  متشکل از متغیرهایی است که بیشترین تأثیر را در خروجی و مدل نهایی هر بخش دارند. حال برای انتخاب مدل برتر برآورد هزینه یک سامانه آبیاری قطره‌ای می‌توان مدل‌های بسیار ساده و یا پیچیده‌ای را انتخاب کرد که به ترتیب با داشتن کمترین و بیشترین داده بتوان یک برآورد معقول و منطقی از خروجی یعنی هزینه را ارائه داد. در مجموع، مدل برتر برای برآورد هزینه کلی احداث یک سامانه آبیاری قطره‌ای با استفاده از کمترین داده و بیشترین دقت و حداقل خطا به صورت  $TC_T = 275379820 * A + 19642999 * (\Delta HSF (m)) + 1822153 * (SR (m)) * (F (day)) * (Qs (kw))$  پیچیدگی ۱۵ و ضریب همبستگی ( $R$ ) برابر با ۰/۷۴۳ و میانگین قدر مطلق خطا ( $MAE$ ) برابر با ۷۷۲۲۰۸۴۵ ریال است.

شکل (۱) متغیرهای مهم و پر تکرار در مدل‌سازی هزینه سامانه‌های آبیاری قطره‌ای را نشان می‌دهد و با یک نگاه می‌توان دریافت که کدام متغیرها بیشترین تأثیر را بر هزینه هر بخش و هزینه کل دارند. این شکل دارای دو ستون است. نمودارهای ستون سمت راست بیانگر تعداد مدل‌هایی که هر متغیر در آنها ظاهر می‌شود و ستون چپ تعداد وقایع هر متغیر در همه مدل‌هاست. برای مثال، در بخش هزینه لوازم داخل مزرعه ( $TC_F$ ) عدد مورد نظر برای متغیر  $A$  در سمت چپ برابر ۳ و در سمت راست شکل (۱) برابر ۴ است. عدد سمت چپ بدین معنی که متغیر  $A$  در سه مدل قرار دارد اما عدد سمت راست نشان می‌دهد که متغیر  $A$  چهار بار



شکل ۱- متغیرهای مهم در مدل‌سازی و تکرار آنها  
Figure 1- Important variables in modeling and their repetition



شکل ۲- رابطه بین پیچیدگی مدل‌ها و خطای برآورد هزینه

Figure 2- Relationship between model complexity and cost estimation error

افزایش پیچیدگی مدل‌ها، دقت مدل‌سازی بیشتر می‌شود و خطای آنها کاهش می‌یابد. با توجه به نمودار مقادیر مشاهداتی در مقابل مقادیر پیش‌بینی‌شده، هرچه زوج مرتب داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده به خط یک‌به‌یک نزدیک‌تر باشد، دقت مدل بالاتر است.

### بررسی دقت مدل‌های برآورد شده

شکل ۳، نمودار خطای بهترین مدل‌های منتخب را برای برآورد هزینه بخش‌های ایستگاه پمپاژ و سیستم کنترل مرکزی (TC<sub>p</sub>)، هزینه لوازم داخل مزرعه (TC<sub>F</sub>)، هزینه نصب و اجرای داخل مزرعه و ایستگاه پمپاژ (TC<sub>i</sub>) و هزینه کل (TC<sub>T</sub>) نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳ می‌توان گفت که با

| بهترین مدل<br>Best model   | مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده<br>Observed vs. Predicted | خروجی در مقابل ردیف<br>Output vs. Row | خطا و پیچیدگی<br>Error/Complexity Pareto |
|--|---|---------------------------------------|--|
| $TC_P = a + b*(L32mm (m)) + c*\sqrt{(PP (kw))} - d*(WA (\%)) - e*\text{xor}(f, (DFE (m)))$   |   |                                       |  |
| <b>هزینه ایستگاه پمپاژ و سیستم کنترل مرکزی</b><br><b>Cost of pumping station and central control system (TCP)</b>                    |   |                                       |  |
| $TC_F = a + A + b*(DSF (m)) + c*A*(L16mm (m))$   |   |                                       |  |
| <b>هزینه لوازم داخل مزرعه</b><br><b>Cost of on-farm equipment (TCF)</b>  |   |                                       |  |
| $TC_I = a + b*(L40mm (m)) + c*(QT (L/S))*(L32mm (m)) + d*(SR (m))^2 - e*(ETP (mm/day))$  |   |                                       |  |
| <b>هزینه نصب و اجرای داخل مزرعه و ایستگاه پمپاژ</b><br><b>Cost of installation and performance on-farm and pumping station (TCI)</b> |   |                                       |  |
| $TC_T = 275379820*A + 19642999*(\Delta HS F (m)) + 1822153*(SR (m))*(F (day))*(Qs (kw))$   |   |                                       |  |
| <b>هزینه کل</b><br><b>Total cost (TC<sub>T</sub>)</b>  |   |                                       |  |

شکل ۳- نمودارهای ارزیابی بهترین مدل‌های انتخاب‌شده در برآورد هزینه بخش‌های مختلف

Figure 3- Evaluation charts of the best selected models in estimating the cost of different parts



## نتیجه‌گیری

آبی و زمین در بحرانی‌ترین حالت)،  $S_R$  (فاصله ردیف گیاهان) و  $L_{40mm}$  (طول لوله رابط دو)؛ و در بخش هزینه کل ( $TC_T$ )، پارامترهای  $A$  (مساحت زمین)،  $PP$  (توان پمپ مورد نیاز) و  $HP$  (ارتفاع پمپاژ) مهم‌ترین و تأثیرگذارترین ویژگی هستند و همگی در سطح اطمینان یک درصد معنی‌دار شدند. همچنین، نتایج مدل‌سازی اقتصادی بخش‌های مختلف هزینه سامانه آبیاری قطره‌ای با استفاده از نرم‌افزار Eureka نشان داده‌است که بیشترین همبستگی در بخش‌های  $TC_P$ ،  $TC_F$ ،  $TC_I$  و  $TC_T$  به ترتیب برابر با  $0/449$ ،  $0/848$ ،  $0/770$  و  $0/743$  به دست آمده که حاکی از دقت مناسب و برآورد قابل قبول این نرم‌افزار برای مدل‌سازی هزینه سامانه آبیاری تحت فشار است. با انجام چنین پژوهش‌هایی که بتوان قبل از اجرای یک سامانه آبیاری، برآورد دقیقی از هزینه‌های اولیه و اجرایی آن داشت؛ می‌توان با در نظر گرفتن تمام عوامل تأثیرگذار در هزینه نهایی یک سامانه در هر منطقه و مقرون به صرفه بودن آن برای دولت و کشاورز، ابتدا یک برآورد اقتصادی را داشت و سپس اقدام به اجرای آن نمود. سپس با توجه صرفه‌جویی در بحث اقتصادی، هزینه ذخیره‌شده را به بهره‌برداری از سامانه آبیاری تحت فشار اختصاص داد. نتایج این مطالعه می‌تواند ابزار بسیار مناسبی برای محققان، مدیران، دانشجویان، مشاوران، پیمانکاران و دیگر افراد دغدغه‌مند در صنعت آب باشد.

پیش‌بینی و برآورد هزینه‌ها در پروژه‌های مهندسی به عنوان عاملی اصلی در مدیریت اجرا محسوب می‌شود. یکی از مهم‌ترین خواسته‌های وزارت جهادکشاورزی، وزارت نیرو، مهندسين مشاور، پیمانکاران، کارفرمایان و حتی کشاورزان، پیش‌بینی هزینه‌های پروژه‌ها در مرحله اولیه طراحی است. عدم اطمینان کامل به هزینه تمام‌شده پروژه در ابتدای کار، وجه اجتناب‌ناپذیر بیشتر پروژه‌های اجرایی می‌باشد که این پژوهش با همین هدف انجام شد. تنها گزینه تا به امروز تخمین‌های تجربی و سرانگشتی توسط افراد باتجربه بوده که چندان دقیق نمی‌باشند و با پیشرفت علم لازم است که این برآوردها به صورت علمی و دقیق‌تر بیان شوند. در این پژوهش، با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک، به مدل‌سازی برآورد هزینه بخش‌های مختلف سامانه‌های آبیاری قطره‌ای پرداخته شد؛ مدل‌های ارائه‌شده دقت بسیار خوبی در هر بخش داشتند. نتایج آنالیز حساسیت و ضریب همبستگی نشان می‌دهد که در بخش هزینه ایستگاه پمپاژ و سیستم کنترل مرکزی ( $TC_P$ )، پارامترهای  $Q_S$  (دبی سیستم)،  $PP$  (توان پمپ مورد نیاز) و  $HP$  (ارتفاع پمپاژ)؛ در بخش هزینه لوازم داخل مزرعه ( $TC_F$ )، پارامترهای  $A$  (مساحت زمین)،  $N_E$  (تعداد کل گسیلنده) و  $L_{16mm}$  (طول کل لترال)؛ در بخش هزینه نصب و اجرای سامانه داخل مزرعه و ایستگاه پمپاژ ( $TC_I$ )، پارامترهای  $\Delta H_{SF}$  (اختلاف ارتفاع منبع

## قدردانی

این مقاله از رساله دکتری نویسنده اول استخراج شده است. بدین وسیله از شرکت مهندسين مشاور آب و خاک البرز و معاونت آب و خاک وزارت جهاد کشاورزی به دلیل در اختیار قراردادن داده‌ها و همچنین گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران به دلیل تأمین امکانات لازم برای انجام این پژوهش و تهیه مقالات مربوطه تشکر و قدردانی می‌شود.

## مراجع

- Afshar, N. R., & Fahmi, H. (2019). Impact of climate change on water resources in Iran. *International Journal of Energy and Water Resources*, 3(1), 55-60.
- Ahmadaali, K., Ramezani Etedali, H., & Hosseini Pazhouh, N. (2017). Assessment of modern irrigation systems in Qom province. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 11(5), 736-749. (In Persian)
- Alshahethi, A. A. A., & Radhika, K. L. (2018). Estimating the Final Cost of Construction Project Using Neural Networks: A Case of Yemen Construction Projects. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 6(11), 2141-2151.
- Amen, R., Hameed, J., Albashar, G., Kamran, H. W., Shah, M. U. H., Zaman, K. U., ... & Ullah, S. (2020). Modeling the Higher Heating Value of Municipal Solid Waste for Assessment of Waste-To-Energy Potential: A Sustainable Case Study. *Journal of Cleaner Production*, 125575.
- Arafa, M., & Alqedra, M. (2011). Early stage cost estimation of buildings construction projects using artificial neural networks. *Early stage cost estimation of buildings construction projects using artificial neural networks*, 4(1).
- Arage, S. S., & Dharwadkar, N. V. (2017). Cost estimation of civil construction projects using machine learning paradigm. In *2017 International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC)* (pp. 594-599). IEEE.
- Bakas, T., Papadimitriou, I., & Argyri, P. (2020). Water crisis-beyond the destruction. *Open Schools Journal for Open Science*, 2.
- Chandanshive, V., & Kambekar, A. R. (2019). Estimation of building construction cost using artificial neural networks. *Journal of Soft Computing in Civil Engineering*, 3(1), 91-107.
- Closas, P., Bugallo, M. F., Coma, E., & Méndez, L. (2013, May). Prediction of influenza rates by particle filtering. In *2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing* (pp. 1046-1050). IEEE.
- Cosgrove, W. J., & Rijsberman, F. R. (2014). *World water vision: making water everybody's business*. Routledge.
- Demirhan, H., & Atilgan, Y. K. (2015). New horizontal global solar radiation estimation models for Turkey based on robust coplot supported genetic programming technique. *Energy Conversion and Management*, 106, 1013-1023.
- Douglas-Smith, D., Iwanaga, T., Croke, B. F., & Jakeman, A. J. (2020). Certain trends in uncertainty and sensitivity analysis: An overview of software tools and techniques. *Environmental Modelling & Software*, 124, 104588.
- Ekung, S., Lashinde, A., & Adu, E. (2021). Critical Risks to Construction Cost Estimation. *Journal of Engineering, Project, and Production Management*, 11(1), 19-29.
- El-Shater, T., Yigezu, Y. A., Shideed, K., & Aw-Hassan, A. (2017). Impacts of Improved Supplemental Irrigation on Farm Income, Productive Efficiency and Risk Management in Dry Areas. *Journal of Water Resource and Protection*, 9(13), 1709.
- FAOSTAT. (2018). World food and agriculture. Statistical Pocketbook, FAO: Rome, Italy.
- Flores, J. H. N., Faria, L. C., Rettore Neto, O., Diotto, A. V., & Colombo, A. (2021). Methodology for Determining the Emitter Local Head Loss in Drip Irrigation Systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 147(1), 06020014.
- Gany, A. H. A., Sharma, P., & Singh, S. (2019). Global Review of Institutional Reforms in the Irrigation Sector for Sustainable Agricultural Water Management, Including Water Users' Associations. *Irrigation and drainage*, 68(1), 84-97.
- Gholizadeh-Sarabi, S., Davary, K., Ghahraman, B., & Shafiei, M. (2019). Historical study of coupled human-water system from socio-hydrological perspective, Case study: Mashhad basin. *Iran-Water Resources Research*, 15(4), 148-170. (In Persian)

- Gomes, F. M., Pereira, F. M., Silva, A. F., & Silva, M. B. (2019). Multiple response optimization: Analysis of genetic programming for symbolic regression and assessment of desirability functions. *Knowledge-Based Systems*, 179, 21-33.
- Gransberg, D. D., & Rueda, J. A. (2020). *Construction equipment management for engineers, estimators, and owners*. CRC Press.
- Günaydin, H. M., & Doğan, S. Z. (2004). A neural network approach for early cost estimation of structural systems of buildings. *International journal of project management*, 22(7), 595-602.
- Hamdi Ahmadabad, Y., Liaghat, A., Rasoulzadeh, A., & Ghaderpour, R. (2019). Investigation of in the Capita Water Consumption Variation in Iran Based on the Past Two-Deca Diet. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(1), 77-87. (In Persian)
- Hassani, Y., Hashemy Shahdany, S. M., & Zahraei, B. (2020) Developing A New Operation-Economic Framework for Irrigation Networks without Water Market. *Journal of Water and Soil Science*, 24(1), 27-43. (In Persian)
- Kadkhodaie, F., Asghari Moghaddam, A., Barzegar, R., & Gharekhani, M. (2020). Comparison of Neural Network and Neuro-Fuzzy Techniques to Improve the DRASTIC Frame Work (Case Study: Shabestar plain Aquifer). *Water and Soil Science*, 30(1), 1-14. (In Persian)
- Karbachevsky, A., Baskin, C., Zheltonozhskii, E., Yermolin, Y., Gabbay, F., Bronstein, A. M., & Mendelson, A. (2021). Early-Stage Neural Network Hardware Performance Analysis. *Sustainability*, 13(2), 717.
- Komkov, V., Choi, K. K., & Haug, E. J. (1986). *Design sensitivity analysis of structural systems* (Vol. 177). Academic press.
- Larsen, P. E., Cseke, L. J., Miller, R. M., & Collart, F. R. (2014). Modeling forest ecosystem responses to elevated carbon dioxide and ozone using artificial neural networks. *Journal of Theoretical Biology*, 359, 61-71.
- Lester, E. I. A. (2017). Estimating. In: Project management, planning and control. *The Netherlands: Elsevier*, 61-65.
- Matel, E., Vahdatikhaki, F., Hosseinyalamdary, S., Evers, T., & Voordijk, H. (2019). An artificial neural network approach for cost estimation of engineering services. *International journal of construction management*, 1-14.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Najarchi, M., shekari, H., jafarinaia, R., Mokhtari, S., & Alizadeh, H. (2019). Optimization of Cropping Pattern and Water Resources at Different Levels of Irrigation for Hot and Dry Areas (Case study: Dehloran Plains, Ilam Province). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(6), 1351-1361. (In Persian)
- NASA Executive Cost Analysis Steering Group. (2015). NASA cost estimating handbook. NASA, 63(4).
- Nguy-Robertson, A., Gitelson, A., Peng, Y., Viña, A., Arkebauer, T., & Rundquist, D. (2012). Green leaf area index estimation in maize and soybean: Combining vegetation indices to achieve maximal sensitivity. *Agronomy Journal*, 104(5), 1336-1347.
- Nonis, F., Barbiero, P., Cirrincione, G., Olivetti, E. C., Marcolin, F., & Vezzetti, E. (2020). Understanding Abstraction in Deep CNN: An Application on Facial Emotion Recognition. In *Progresses in Artificial Intelligence and Neural Systems* (pp. 281-290). Springer, Singapore.
- Oki, T. (2020). World Water Resources at Stake. In *Human Geoscience* (pp. 89-95). Springer, Singapore.
- Park, C. S. (2012). *Fundamentals of Engineering Economics*. Chan S. Park. Pearson Education.
- Perry, C., Steduto, P., & Karajeh, F. (2017). Does improved irrigation technology save water? A review of the evidence. *Food and Agriculture Organization of the United Nations, Cairo*, 42.

- Pettang, C., Mbumbia, L., & Foudjet, A. (1997). Estimating building materials cost in urban housing construction projects, based on matrix calculation: the case of Cameroon. *Construction and building materials*, 11(1), 47-55.
- Pourgholam-Amiji, M., Liaghat, A., Ghameshloua, A., Khoshravesh, M., Waqas, M.M. (2020). Investigation of the yield and yield components of rice in areas with shallow water table and saline. *Big Data in Agriculture (BDA)*, 2(1), 36-40.
- Pourgholam-Amiji, M., Liaghat, A., Vali, M. H., & Parsamehr, H. R. (2020). Construction of A Moisture Sensor for Smart Irrigation and Determine the Proper Location for Installation to Stop Irrigation to Prevent Water Loss. *Water Management in Agriculture*, 6(2), 21-36. (In Persian)
- Qian, G., & Mahdi, A. (2020). Sensitivity analysis methods in the biomedical sciences. *Mathematical Biosciences*, 323, 108306.
- Rampone, S., & Valente, A. (2017). Prediction of seasonal temperature using soft computing techniques: application in Benevento (Southern Italy) area. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 8(1), 147-154.
- Saltelli, A., Aleksankina, K., Becker, W., Fennell, P., Ferretti, F., Holst, N. ... & Wu, Q. (2019). Why so many published sensitivity analyses are false: A systematic review of sensitivity analysis practices. *Environmental modelling & software*, 114, 29-39.
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D. ... & Tarantola, S. (2008). *Global sensitivity analysis: the primer*. John Wiley & Sons.
- Schmidt, M., & Lipson, H. (2009). Distilling free-form natural laws from experimental data. *Science*, 324(5923), 81-85.
- Schmidt, M., Carter, J., Stone, G., & O'Reagain, P. (2016). Integration of optical and X-band radar data for pasture biomass estimation in an open savannah woodland. *Remote Sensing*, 8(12), 989.
- Vaghefi, S. A., Keykhai, M., Jahanbakhshi, F., Sheikholeslami, J., Ahmadi, A., Yang, H., & Abbaspour, K. C. (2019). The future of extreme climate in Iran. *Scientific reports*, 9(1), 1-11.
- Valentín, F., Nortes, P. A., Domínguez, A., Sánchez, J. M., Intrigliolo, D. S., Alarcón, J. J., & López-Urrea, R. (2020). Comparing evapotranspiration and yield performance of maize under sprinkler, superficial and subsurface drip irrigation in a semi-arid environment. *Irrigation Science*, 38(1), 105-115.
- Weber, F., Theers, S., Surmann, D., Ligges, U., & Weihs, C. (2018). Sensitivity analysis of ordinary differential equation models.
- Wen, L., Li, Q., Li, Y., & Ma, Z. (2018). Carbon Emission and Economic Growth Model of Beijing Based on Symbolic Regression. *Polish Journal of Environmental Studies*, 27(1).
- Wu, N., & Shih, S. G. (2020). Cost estimation through Monte Carlo simulation in architectural early design stage. *The International Journal of Electrical Engineering & Education*, 0020720920923308.
- Yin, Z., Luo, Q., Wu, J., Xu, S., & Wu, J. (2021). Identification of the long-term variations of groundwater and their governing factors based on hydrochemical and isotopic data in a river basin. *Journal of Hydrology*, 592, 125604.
- Zhang, Y. F., & Fuh, J. Y. H. (1998). A neural network approach for early cost estimation of packaging products. *Computers & Industrial Engineering*, 34(2), 433-450.
- Zwaving, J. O. (2014). Probabilistic estimating of engineering costs.

## **Modeling of Design and Implementation Cost of Drip Irrigation Systems**

**M. Pourgholam-Amiji, A. Liaghat and Kh. Ahmadaali\***

\* Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Arid and Mountainous Regions Reclamation, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: Khahmadauli@ut.ac.ir  
Received: 19 January 2021, Accepted: 26 March 2021

### **Extended Abstract**

#### **Introduction**

Allocating of budget to implement pressurized irrigation projects to save water, energy and increase food security has been one of the government's goals in recent decades and is considered as the ideal project of the country. For this reason, it is essential to be aware of the costs. Therefore, estimating the initial and final cost of the project, especially irrigation systems, is one of the project management tools that allow project managers to make more accurate decisions at different stages. Finding a model to identify the important factors affecting the final cost of an irrigation system, as well as formulating it for use throughout the country and regions with different characteristics, is what the present study seeks.

#### **Methodology**

The aim of this study was to estimate the cost of drip irrigation projects in the early stages of design using genetic programming technique, using data from 100 drip irrigation projects, in four sections including; cost of pumping station and central control system ( $TC_P$ ), cost of on-farm equipment ( $TC_F$ ), cost of installation and performing on-farm and pumping station ( $TC_I$ ) and total cost ( $TC_T$ ). First, a database containing 39 important and influential variables on the cost of the mentioned sections was prepared and the prices of the projects were updated for the base year of 2019. In the next step, the most important features that had the highest impact on the costs were selected using Eureka Formulize software and using genetic programming. In the last stage, different models were presented in each section to estimate the cost and the best model in each section was introduced based on the statistics of accuracy and complexity.

#### **Results and Discussion**

The results of correlation analysis between independent variables and dependent variable (cost of each section) show that in  $TC_P$  section  $P_P$  variable (pump power required), in  $TC_F$  section  $L_{16mm}$  variable (total lateral length), in  $TC_I$  section  $S_R$  variable (plant row spacing) and in the  $TCT$  section, the  $H_P$  variable (pumping height), they had the highest correlation coefficient ( $R$ ) of 0.77, 0.64, 0.36 and 0.43, respectively, and were significant at the 1% confidence level. Also, the results of cost modeling for drip irrigation system showed that in the  $TC_P$  section, a model with an evaluation criterion of  $R$  equal to 0.449, MAE (average absolute error value) equal to 27236333 Rials and complexity of 22 was the best model. These evaluation criteria for the best model in the  $TC_F$  section were equal to 0.848, 21198257 Rials and 13, in the  $TC_I$  section equal to 0.770, 45483996 Rials and 11, and in the  $TC_T$  section these criteria were obtained 0.743, 77220845 Rials and 15, respectively.

#### **Conclusions**

In this study, the cost estimation of different parts of the drip irrigation system was modeled using genetic programming algorithm, and the obtained results showed that the presented models

had excellent accuracies in each part. Also, the results of this study indicate the appropriate accuracy and acceptable estimate of Eureka software for modeling the cost of pressurized irrigation system. The results of this study can be a very useful tool for researchers, managers, students, consultants, contractors and those who are concerned in the water industry. By conducting similar research, it is possible to make an economic estimate with a high accuracy before the implementation stage.

#### **Acknowledgement**

This article is extracted from the Ph.D. dissertation, the first author of the article. For this purpose, the authors of the article would like to thank the Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran for their excellent cooperation, providing the necessary facilities for this research and the preparation of relevant articles.

**Keywords:** Pressurized Irrigation, Cost Estimation, Genetic Algorithm, Feature Selection, Eureka Formulize.