

مقاله علمی-پژوهشی

رتبه‌بندی سامانه‌های آبیاری بارانی با ترکیب روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره آنتروپی، تحلیل روابط خاکستری و تاپسیس (EGC-TOPSIS): دشت دهگلان

اکرم سیفی^۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۴/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۶/۴

چکیده

امروزه انتخاب سامانه‌های آبیاری مناسب در مزارع برای افزایش بهره‌وری آب یک ضرورت است. انتخاب سامانه‌های آبیاری در مناطق مختلف امری پیچیده و تحت تأثیر عوامل و سطوح مختلف تصمیم‌گیری می‌باشد. در تحقیق حاضر، با ترکیب روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره آنتروپی، تحلیل روابط خاکستری و تاپسیس (EGC-TOPSIS)، روش انتخاب یکپارچه‌ای برای انتخاب سامانه آبیاری بارانی مناسب بر اساس شاخص‌های ارزیابی عملکرد آنها ارائه و نتایج آن با روش آنتروپی-تاپسیس (E-TOPSIS) مقایسه شد. همچنین از مدل ترکیبی تحلیل مؤلفه‌های اصلی-رگرسیون خطی چندگانه (MLR-PCA) برای ارائه روابط پیش‌بینی شاخص تصمیم‌گیری در روش پیشنهادی EGC-TOPSIS و شاخص نزدیکی فاصله در روش E-TOPSIS بهره گرفته شد. بدین منظور ۲۰ سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت آبپاش متحرک و لوله چرخدار دشت دهگلان کردستان ارزیابی شد. ارزیابی به روش آبپاش منفرد و با استفاده از شاخص‌های ضریب یکنواختی کریستیان سن، یکنواختی توزیع، راندمان پتانسیل کاربرد ربع پایین، راندمان کاربرد ربع پایین، تلفات نفوذ عمقی و تلفات پاششی انجام شد. نتایج تئوری آنتروپی نشان داد که یکنواختی توزیع با وزن ۰/۱۹۴ مؤثرترین معیار در رتبه‌بندی سامانه‌های آبیاری مورد مطالعه است. میانگین شاخص تصمیم‌گیری نهایی و میانگین رتبه‌های سامانه‌های آبیاری لوله چرخدار به ترتیب برابر با ۰/۵۲ و ۹/۱ محاسبه شد که حاکی از برتری این سامانه‌ها نسبت به کلاسیک ثابت آبپاش متحرک در منطقه مورد مطالعه بود. این نتیجه با روش تحلیل خوشه‌ای نیز مورد تأیید قرار گرفت. نتایج رتبه‌بندی دو روش ترکیبی EGC-TOPSIS و E-TOPSIS به طور معناداری با $R^2=0.79$ به یکدیگر همبسته بودند. همچنین، مدل ترکیبی MLR-PCA با سه مؤلفه اصلی، به طور مطلوبی با $R^2=0.95$ قادر به پیش‌بینی مقادیر شاخص تصمیم‌گیری نهایی بود. به طور کلی مدل EGC-TOPSIS با منطق ریاضی قوی می‌تواند نتایج مفید، جامع و کاربردی را ایجاد کند و در ارزیابی و رتبه‌بندی سامانه‌های آبیاری مناطق مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: امکان‌سنجی، پتانسیل‌یابی، تحلیل مؤلفه‌های اصلی، سامانه آبیاری نوین، شاخص‌های عملکرد

مقدمه

آبیاری تحت فشار مناسب در هر منطقه، متأثر از عوامل مختلفی همچون اقلیم، کیفیت آب و خاک و توپوگرافی است که وجود برخی محدودیت‌ها در این عوامل می‌تواند منجر به عملکرد نامطلوب آنها شود (احمدی و همکاران، ۱۳۹۷). از آنجایی که سامانه‌های آبیاری تحت فشار نیازمند تجهیزات خاص هستند، عدم انتخاب صحیح سامانه آبیاری مناسب هر منطقه باعث اتلاف هزینه و وقت، غیراقتصادی شدن کشاورزی و اتلاف منابع آب و خاک می‌شود (هادی‌زاده، ۱۳۸۵). بنابراین ارزیابی و رتبه‌بندی از جمله ابزارهای مفید برای شناخت وضعیت موجود سامانه‌های آبیاری و انجام برنامه‌ریزی‌های کارآمد می‌باشد (نصیری قیداری و همکاران، ۱۳۸۹). امکان‌سنجی و رتبه‌بندی سامانه‌های آبیاری تحت فشار با توجه به وضعیت توپوگرافی، خصوصیات خاک، شرایط اقلیمی، نوع محصول، کمیت و کیفیت آب، نیروی انسانی، مسائل فرهنگی و

کشاورزی با مصرف حدود ۷۱ درصد منابع آب تجدیدپذیر، بزرگترین مصرف‌کننده آب نسبت به صنعت و شرب می‌باشد (ناصری و همکاران، ۱۳۹۶) که در مناطق خشک و نیمه‌خشک این وضعیت تشدید می‌شود. با توجه به محدودیت منابع آبی، افزایش تقاضا برای آب آبیاری و تهدیدات تغییر اقلیم، نیاز به مدیریت بهتر آب و بهبود راندمان استفاده از آب در سامانه‌های آبیاری ضروری به نظر می‌رسد (Conrad et al., 2007). سامانه‌های آبیاری نوین تحت فشار یکی از راه‌حل‌ها و استراتژی‌های مطلوب برای بهبود راندمان‌های آبیاری است که در اولویت برنامه‌های توسعه‌ای دولت قرار دارد. اجرای روش

۱- گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان، ایران
Email: a.seifi@vru.ac.ir

ارزیابی ریسک زیرساخت‌ها (Behzadian et al., 2012)، ارزیابی شبکه‌های آبیاری و زهکشی (نصیری قیداری و همکاران، ۱۳۸۹؛ نیک‌مهر و زیبایی، ۱۳۹۵)، ارزیابی آلودگی آب‌های زیرزمینی (سیفی و سروش، ۱۳۹۸) و ارزیابی ساختارهای انتقال آب (Hosseinzade et al., 2017) استفاده شده است. از روش MADM برای ارزیابی و رتبه‌بندی سامانه‌های آبیاری نیز استفاده شده است (بی‌نام، ۱۳۸۵؛ کهنسال و رفیعی، ۱۳۸۷؛ قره‌داغی و همکاران، ۱۳۹۰؛ قره‌داغی و همکاران، ۱۳۹۲؛ صدیق‌کیا و همکاران، ۱۳۹۳؛ Montazar and Darouich et al., 2013; Behbahani, 2007).

اخیراً از روش‌های جدید MADM با پشتوانه ریاضی، همچون تحلیل روابط خاکستری^۲، تحلیل مؤلفه‌های اصلی^۳، تاگوچی^۴ و تاپسیس^۵ (TOPSIS) برای تصمیم‌گیری در زمینه‌های مختلف استفاده شده است (Gu and Xu, 2011; Tu et al., 2014; Zhang et al., 2015; Shafiullah and Al-Ruwaihi, 2020; Yang et al., 2020). روش TOPSIS، روشی مهم و کاربردی و با ساختاری قوی از تکنیک‌های MADM به شمار می‌رود که اولویت‌بندی را بر اساس نزدیکی به جواب ایده‌آل انجام می‌دهد (آذر و رجب‌زاده، ۱۳۸۱). استفاده از روش TOPSIS برای اولین بار توسط وانگ و یون^۶ پیشنهاد شد (Cevik Onar et al., 2014). در مقایسه با دیگر روش‌ها، TOPSIS دارای اصول محاسباتی قوی و ساده‌ای است که نتایج شهودی و قابل اطمینانی را ارائه می‌کند. در این روش، هیچ محدودیت خاصی برای داده‌های هدف وجود ندارد و قابلیت فهم بالایی دارد (Liu et al., 2019). بسیاری از محققان به دنبال ترکیب روش TOPSIS با سایر روش‌های قوی ریاضی، برای ارزیابی و رتبه‌بندی مسائل مختلف هستند. به عنوان مثال، ترکیب تحلیل روابط خاکستری با TOPSIS برای ارزیابی امنیت منابع آب (Dai et al., 2010)، ترکیب روش AHP و TOPSIS برای مطالعه مشکل حفاظت سواحل (Chang et al., 2012)، ترکیب rough set و TOPSIS برای ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی (Li et al., 2012) و ترکیب فازی و TOPSIS برای ارزیابی نیروگاه‌ها در ترکیب (Boran, 2017) استفاده شده است.

با وجود تحقیقات انجام شده در زمینه رتبه‌بندی سامانه‌های آبیاری، تاکنون مطالعه‌ای در رابطه با استفاده از روش‌های نوین و قوی ترکیبی MADM در این زمینه انجام نشده است. بررسی سوابق مطالعاتی در این زمینه نشان می‌دهد که روش‌های قبلی وزن‌دهی

اجتماعی منطقه و همچنین جنبه اقتصادی آن انجام می‌شود (علیزاده، ۱۳۹۰). طرح‌های مطالعاتی و تحقیقاتی اندکی در این زمینه در کشور گزارش شده است که می‌توان به مطالعات بی‌نام (۱۳۸۵)، هادی‌زاده (۱۳۸۵)، قره‌داغی و همکاران (۱۳۹۰)، قره‌داغی و همکاران (۱۳۹۲)، صدیق‌کیا و همکاران (۱۳۹۳) و مجنونی هریس و همکاران (۱۳۹۶) اشاره کرد. هدف اصلی از انتخاب سامانه آبیاری مناسب، بهبود عملکرد و افزایش بهره‌وری می‌باشد. مطالعات متعددی عملکرد سامانه‌های آبیاری بارانی را پایین گزارش کرده‌اند و علت آن ناشی از مشکلات مراحل طراحی، اجرا و بهره‌برداری ذکر کرده‌اند (فاریابی و همکاران، ۱۳۸۹؛ مشرفی و همکاران، ۱۳۹۲؛ مولایی و همکاران، ۱۳۹۵). اثر عوامل اقلیمی و هیدرولیکی (فرزان‌کیا و همکاران، ۱۳۹۳؛ رستمیان و همکاران، ۱۳۹۳؛ آذریو و همکاران، ۱۳۹۵) و همچنین برخی پارامترهای اجرایی (وردی نژاد و همکاران، ۱۳۹۶) بر عملکرد سامانه‌های آبیاری، در مطالعات فراوانی گزارش شده است که مؤید اعمال تمامی عوامل مذکور در انتخاب و رتبه‌بندی سامانه‌های مذکور می‌باشد. عباسی و همکاران (۱۳۹۵) با جمع‌بندی نتایج تحقیقات مختلف مرتبط با راندمان سامانه‌های آبیاری در کشور ذکر کردند که از بین روش‌های آبیاری بارانی، روش آبفشان غلطان بیشترین راندمان (۶۶/۹ درصد) و کلاسیک ثابت (۵۲/۱ درصد) کمترین راندمان کاربرد را دارند. یکی از خلل‌های روش مذکور در انتخاب و رتبه‌بندی سامانه آبیاری مناسب، نقش مؤثر مدیریت و بهره‌برداری کشاورز می‌باشد. مدیریت و بهره‌برداری مطلوب از سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت می‌تواند راندمان پتانسیل کاربرد را تا ۸۰ درصد بهبود دهد (Maroufpoor et al., 2019). لذا با رتبه‌بندی سامانه‌های آبیاری بر اساس شاخص‌های ارزیابی عملکرد آنها، نقش تمامی عوامل مؤثر اقلیمی، هیدرولیکی و مدیریتی به نحو مطلوب در نظر گرفته خواهد شد که در این تحقیق این مهم مورد توجه قرار گرفته است.

با توجه به ملاحظات مختلف در زمینه انتخاب سامانه‌های آبیاری، انتخاب روشی اصولی برای تحلیل معیارها و تصمیم‌گیری بهینه ضروری می‌باشد. انتخاب سامانه آبیاری مناسب یک تصمیم چندمعیاره است و هر سامانه آبیاری در شرایط و موقعیت‌های خاصی امکان اجرا دارد. در تصمیم‌گیری چندمعیاری^۱ (MADM)، معیارهای تصمیم‌گیری می‌توانند کمی یا کیفی، مثبت یا منفی باشند (مجنونی هریس و همکاران، ۱۳۹۶). با توجه به تعدد و تنوع عوامل مؤثر بر عملکرد سامانه‌های آبیاری بارانی در هر منطقه، استفاده از روش MADM قابلیت مناسبی در ارزیابی عملکرد و رتبه‌بندی این سامانه‌ها دارد. از روش MADM در زمینه‌های مختلف مطالعاتی از جمله مدیریت حوضه‌های شهری (Chung et al., 2011)، مدیریت آب و فاضلاب (Afshar et al., 2011; Pagsuyoin et al., 2015)،

2- Grey relational analysis

3- Principal component analysis

4- Taguchi

5- Technique for Order-Preference by Similarity to Ideal Solution

6- Hwang and Yoon

1- Multi-attribute decision-making

دشت ۱۱ درجه سانتی‌گراد است. اراضی دشت دهگلان جزو اراضی قابل کشت کشور محسوب می‌شوند (دلبری و همکاران، ۱۳۸۹؛ عباسی و همکاران، ۱۳۹۵). در شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه ارائه شده است.

در این تحقیق، ۲۰ سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت آبیاری متحرک و لوله چرخدار از مزارع دشت دهگلان مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور از اطلاعات موجود در مطالعه فاریابی و همکاران (۱۳۸۹) و مشرفی و همکاران (۱۳۹۲) استفاده شد. این سامانه‌ها به صورت کاملاً تصادفی و از بین سامانه‌هایی انتخاب شده بودند که حداقل یک فصل زراعی مورد بهره‌برداری قرار گرفته باشند. در جدول ۱ اطلاعات مربوط به سامانه‌های آبیاری مورد ارزیابی ارائه شده است. اطلاعات مرتبط با خصوصیات آب آبیاری و خاک تحت کشت در تحقیقات فاریابی و همکاران (۱۳۸۹) و مشرفی و همکاران (۱۳۹۲) ارائه شده است. بر اساس اعداد موجود، شوری آب آبیاری تمام نمونه‌ها کمتر از ۰/۷ میلی‌موس بر سانتی‌متر است که برای مصارف کشاورزی بدون محدودیت است. غلظت سدیم آب در مزارع سامانه‌های آبیاری کلاسیک ثابت آبیاری متحرک بین ۰/۸ تا ۴ و غلظت کلر کمتر از یک میلی‌اکی‌والان در لیتر اندازه‌گیری شده است. اما غلظت این دو عنصر در مزارع دارای سامانه‌های لوله چرخدار کمتر از یک گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهد که محدودیتی به لحاظ غلظت دو عنصر کلر و سدیم در مزارع شامل لوله چرخدار وجود ندارد اما مزارع سامانه‌های آبیاری کلاسیک ثابت آبیاری متحرک محدود کم تا متوسط داشته‌اند. به طور کلی آب آبیاری مزارع در طبقه C2S1 قرار می‌گیرد که مناسب برای کشاورزی می‌باشد. نتایج آنالیز خاک مزارع نیز نشان می‌دهد که مشکلات مربوط به شوری و سدیمی بودن در این خاک‌ها وجود ندارد و در کلاس نرمال ($EC < 4$ ، $SAR < 13$) قرار می‌گیرند. خصوصیات شیمیایی و فیزیکی آب و خاک مزارع، نشان‌دهنده عدم محدودیت کاربری برای سامانه‌های آبیاری بارانی می‌باشد.

شاخص‌های ارزیابی سامانه‌های آبیاری مورد مطالعه

شاخص‌های متعددی برای بررسی عملکرد سامانه‌های آبیاری پیشنهاد شده است (Silva, 2006). این شاخص‌ها، ابزاری برای مدیریت در بخش آبیاری می‌باشند. بسیاری از محققان از یکنواختی توزیع آب^۵ (DU) به عنوان مهمترین شاخص ارزیابی عملکرد سامانه‌های آبیاری استفاده می‌کنند (Seginer and Kostinsky, 1975) که مستقیماً تابع تولید گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Keller, 1983).

AHP مبتنی بر قضاوت فردی و کارشناسی است و تابع نظرات افراد، نتایج ممکن است، متفاوت باشد. به همین منظور لزوم ارائه روشی با مبنای محاسباتی و ریاضی و مستقل از قضاوت فردی محسوس است. بنابراین در تحقیق حاضر، از ترکیب روش‌های تحلیل همبستگی خاکستری^۱ (GC) و آنتروپی^۲-تاپسیس (ETOPSIS) برای رتبه‌بندی سامانه‌های آبیاری بارانی دشت دهگلان استان کردستان استفاده شد. از روش آنتروپی برای تعیین وزن شاخص‌ها و اجتناب از اثرات نسبت‌های مختلف شاخص‌های متنوع روی دقت ارزیابی در فرآیند محاسبه شاخص استفاده می‌شود. در روش Topsis، از چشم‌انداز نزدیکی نمونه‌ها به جواب ایده‌آل استفاده می‌شود اما تنوع پیچیدگی سامانه مورد ارزیابی قرار نمی‌گیرد. بنابراین برای بهبود دقت نتایج، از روش تحلیل GC برای اندازه‌گیری درجه تشابه شاخص‌ها و بررسی پیچیدگی سامانه استفاده می‌شود. تحلیل GC، می‌تواند بیانگر روابط غیرخطی بین شاخص‌ها و میزان وابستگی موجود بین فاکتورهای یک سامانه باشد (Liu et al., 2019). از تحلیل روابط خاکستری برای حل مسائل پیچیده بین چندین متغیر استفاده می‌شود. این روش، روابط غیرقطعی سامانه را با یک عضو مرجع تحلیل کرده و قابلیت استفاده در مسائل MADM را دارد (تیموری و همکاران، ۱۳۹۷). تئوری تحلیل خاکستری توسط دنگ پایه‌ریزی شده و در زمینه‌های مختلف خوشه‌بندی و تصمیم‌گیری کاربرد فراوان داشته است (Ju-Long, 1982).

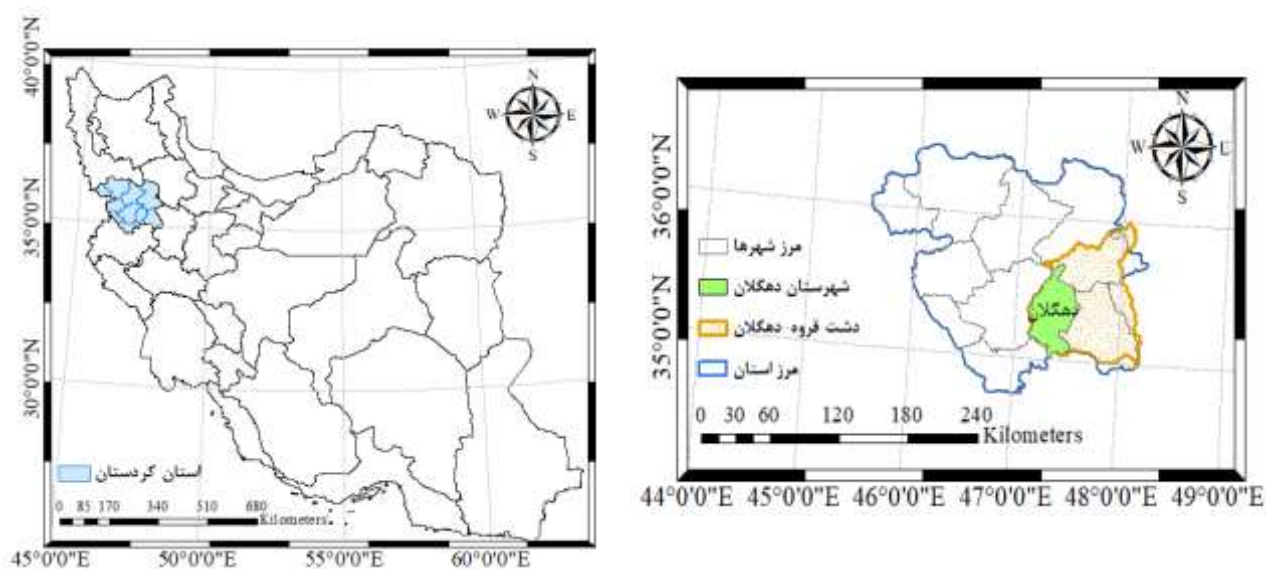
اهداف تحقیق حاضر شامل (۱) توسعه مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره ترکیبی EGC-TOPSIS برای رتبه‌بندی سامانه‌های آبیاری بارانی بر اساس شاخص‌های ارزیابی عملکرد، (۲) مقایسه نتایج مدل ترکیبی EGC-TOPSIS با مدل E-TOPSIS در اولویت‌بندی و انتخاب سامانه‌های آبیاری بارانی مناسب برای منطقه مورد مطالعه، و (۳) توسعه روابط پیش‌بینی شاخص‌های تصمیم‌گیری و رتبه‌دهی بر اساس روش ترکیبی تحلیل مؤلفه‌های اصلی^۳-رگرسیون خطی چندگانه^۴ (MLR-PCA) می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دشت دهگلان در موقعیت جغرافیایی ۱۰° ۴۷' تا ۴۷° ۴۵' طول شرقی و ۵° ۳۵' تا ۳۵° ۳۵' عرض شمالی در شرق استان کردستان قرار دارد. مساحت دشت ۶۲۴ هکتار و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۸۷۶ متر می‌باشد. متوسط بارندگی آن ۳۴۰ میلی‌متر و اقلیم آن نیمه‌خشک و سرد است (مشرفی و همکاران، ۱۳۹۲). متوسط دمای سالانه در این

- 1- Grey correlation
- 2- Entropy
- 3- Principal component analysis
- 4- Multiple linear regression



شکل ۱- موقعیت استان کردستان و دشت دهگلان در تقسیمات کشوری

جدول ۱- مشخصات سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت و لوله چرخ‌دار مورد ارزیابی در دشت دهگلان

نوع سامانه	محصول	نوع آبیاری	فواصل آبیاری (m * m)	دور آبیاری (day)	مدت آبیاری (hr)
C1	یونجه	AMBO	۲۵×۲۵	۷	۸
C2	یونجه	AMBO & ZM22	۲۶×۲۶	۵	۴
C3	گندم	AMBO	۲۵×۲۵	۷	۴
C4	گندم	ZK30	۲۵×۲۵	۱۰	۴
C5	یونجه	ZK30	۲۴×۲۱	۷	۶
C6	سیب زمینی	AMBO & ZK30	۲۳×۲۵	۷	۴
C7	یونجه	AMBO	۲۵×۲۵	۹	۶
C8	سیب زمینی	AMBO	۲۵×۲۸	۷	۴
C9	یونجه	AMBO	۲۴×۲۵	۷	۷
C10	سیب زمینی	AMBO	۲۵×۲۸	۷	۴
W1	یونجه	VYR35	۱۲×۱۸	۴	۴
W2	یونجه	VYR35	۱۲×۱۸	۷	۷
W3	یونجه	VYR35	۱۲×۱۸	۸	۸
W4	یونجه	VYR35	۱۲×۱۸	۸	۶
W5	یونجه	VYR35	۱۲×۱۸	۷	۸
W6	سیب زمینی	VYR35	۱۲×۱۸	۶	۷
W7	گندم	VYR35	۱۲×۱۸	۸	۷
W8	گندم	VYR35	۱۲×۱۸	۷	۶
W9	سیب زمینی	VYR35	۱۲×۱۸	۷	۸
W10	سیب زمینی	VYR35	۱۲×۱۸	۷	۸

C: کلاسیک ثابت- آبیاری متحرک، W: لوله چرخ‌دار

مریام و کلر، شاخص یکنواختی توزیع، راندمان کاربرد آب در ربع پایین^۱ (AELQ)، راندمان پتانسیل کاربرد آب در ربع پایین^۲ (PELQ)

1- Application Efficiency of Low Quarter

2- Potential Application Efficiency of Low Quarter

میانگین یک‌چهارم عمق آب ذخیره شده در ناحیه ریشه، کمبود رطوبت خاک (SMD) قرار می‌گیرد.

$$AELQ_t = \frac{SMD}{D_r} \times 100 \quad (۴)$$

راندمان پتانسیل کاربرد در ربع پایین (PELQ) که حداکثر راندمان ممکن برای سامانه موجود می‌باشد نیز با استفاده از فرمول زیر برای تمامی مزارع محاسبه گردید.

$$PELQ_t = \frac{D_q}{D_r} \times 100 \quad (۵)$$

که در آن $PELQ_t$: راندمان پتانسیل کاربرد آب در ربع پایین بلوک آزمایش (درصد) است. برای بازده پتانسیل کاربرد در ربع پایین محدوده ۶۵ تا ۸۵ درصد توصیه شده است (Merriam and Keller, 1978).

در آبیاری بارانی به دلیل وجود اختلاف فشار در هریک از سامانه‌ها، راندمان پتانسیل کاربرد و راندمان واقعی کاربرد ربع پایین مربوط به کل سامانه، کمتر از مقادیر آنها برای بلوک آزمایش می‌باشد. برای این منظور از روابط زیر جهت محاسبه راندمان پتانسیل کاربرد و راندمان کاربرد ربع پایین مربوط به کل سامانه استفاده شد (Merriam and Keller, 1978).

$$PELQ_s = (1 - ER) \times PELQ_t \quad (۶)$$

$$AELQ_s = (1 - ER) \times AELQ_t \quad (۷)$$

که در آن $PELQ_s$: راندمان پتانسیل کاربرد ربع پایین سامانه (درصد)، $AELQ_s$: راندمان کاربرد ربع پایین سامانه (درصد) و ER : ضریب کاهش راندمان، که از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$ER = \frac{0.2 \times (P_{max} - P_{min})}{P_{mean}} \quad (۸)$$

که در آن، P_{min} ، P_{max} و P_{mean} به ترتیب حداقل فشار، حداکثر فشار و فشار متوسط سامانه (بار) می‌باشند.

پایین بودن AELQ بیانگر مشکلات مدیریتی است ولی تفاوت PELQ و AELQ ابعاد این مشکلات را بهتر نمایان می‌کند. مقادیر ۶۵ تا ۸۵ درصد برای شاخص‌های PELQ و AELQ توصیه شده است (Merriam and Keller, 1978).

مقداری از آب در حین خروج از آبیاری به دلیل اثر باد و تبخیر تلف شده که به آن تلفات پاششی (L_s) گویند (Dechmi et al., 2003) که از رابطه ۹ به دست می‌آید.

$$L_s = \frac{D_r - \bar{D}}{D_r} \times 100 \quad (۹)$$

درصد تلفات عمقی، DP ، قسمتی از آب داده شده را که به صورت تلفات عمقی از انتهای ناحیه ریشه عبور کرده باشد، نشان می‌دهد. از رابطه ۱۰ برای محاسبه تلفات نفوذ عمقی استفاده شد (Walker and Skogerboe, 1987).

$$DP = \frac{V_{za} - SMD \times A_d}{q \times t_{cn}} \times 100 \quad (۱۰)$$

و ضریب یکنواختی^۱ (CU) را برای ارزیابی سامانه‌های آبیاری معرفی کرده‌اند (Merriam and Keller, 1978). به منظور محاسبه شاخص‌های ارزیابی، لازم است در ابتدا با استفاده از شبکه اندازه‌گیری مزرعه‌ای، شبکه محاسباتی تشکیل شود. شبکه محاسباتی بیانگر میزان هم‌پوشانی پاشش آبیاری‌های مجاور بر محدوده مذکور می‌باشد. اطلاعات تکمیلی در رابطه با نحوه شبکه‌بندی، اندازه‌گیری دبی و فشار آبیاری‌ها در تحقیق فاریابی و همکاران (۱۳۸۹) و مشرفی و همکاران (۱۳۹۲) ارائه شده است. در این مطالعات، از روش آبیاری منفرد برای اندازه‌گیری یکنواختی توزیع آب در مزرعه استفاده شده است (Christiansen, 1942).

ضریب یکنواختی کریستیانسن شاخص مناسبی برای نشان دادن یکنواختی توزیع آب در سامانه‌های آبیاری بارانی می‌باشد (Maroufpoor et al., 2010). برای تعیین این ضریب از رابطه (۱) استفاده گردید (Merriam and Keller, 1978):

$$CU = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |D_i - \bar{D}|}{n \times \bar{D}} \right] \times 100 \quad (۱)$$

که در آن، CU : ضریب یکنواختی کریستیانسن (درصد)، n : تعداد قوطی‌ها، \bar{D} : میانگین عمق آب جمع شده در قوطی‌ها (میلی متر) و D_i : عمق آب در هریک از قوطی‌ها (میلی متر) است. برای محصولات معمولی با عمق ریشه متوسط، مقدار CU بین ۸۱ تا ۸۷ درصد توصیه شده است (Merriam and Keller, 1978).

یکنواختی توزیع آب (DU)، پارامتری است که میزان یکنواختی کاربرد آب در سطح مزرعه را تعیین می‌کند. برای محاسبه آن از رابطه ۲ استفاده شد.

$$DU = \frac{D_q}{D} \times 100 \quad (۲)$$

که در آن DU : یکنواختی توزیع آب (درصد) و D_q : میانگین یک‌چهارم عمق آب نفوذ کرده (میلی متر) می‌باشد. مقدار توصیه شده یکنواختی توزیع آب بین ۷۰ تا ۸۰ درصد می‌باشد (Merriam and Keller, 1978).

برای محاسبه راندمان کاربرد آب در ربع پایین برای بلوک آزمایش، از معادله زیر استفاده شد (Merriam and Keller, 1978).

$$AELQ_t = \frac{D_q}{D_r} \times 100 \quad (۳)$$

که در آن، $AELQ_t$: راندمان کاربرد آب در ربع پایین اراضی در بلوک آزمایش (درصد) و D_r : متوسط عمق آب آبیاری (میلی‌متر) است. در صورتی که میانگین یک‌چهارم عمق آب نفوذ کرده در خاک، بیشتر از مقدار آب مورد نیاز جهت رساندن رطوبت خاک از وضع موجود به ظرفیت زراعی باشد، تلفات نفوذ عمقی وجود داشته و راندمان واقعی کاهش خواهد یافت و در صورت کسر فوق به جای

و $r_j^- = \max\{r_{ij}, i = 1, 2, \dots, m\}$ استفاده می‌شود.

گام ۴: برآورد مقادیر جداگانه‌ای از هر گزینه برای حل‌های ایده‌آل مثبت و منفی بر اساس فاصله اقلیدسی.

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (r_{ij} - r_j^+)^2} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (16)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (r_{ij} - r_j^-)^2} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (17)$$

که S_i^+ و S_i^- به ترتیب فاصله لامین گزینه از راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی هستند.

گام ۵: محاسبه درجه همبستگی خاکستری برای هر گزینه با توجه به فاصله هر معیار از راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت و منفی

$$G_i^+ = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n g_{ij}^+, \quad \text{where } g_{ij}^+ = \frac{\min_i \min_j |r_j^+ - r_{ij}| + \delta \max_i \max_j |r_j^+ - r_{ij}|}{|r_j^+ - r_{ij}| + \delta \max_i \max_j |r_j^+ - r_{ij}|} \quad (18)$$

$$G_i^- = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n g_{ij}^-, \quad \text{where } g_{ij}^- = \frac{\min_i \min_j |r_j^- - r_{ij}| + \delta \max_i \max_j |r_j^- - r_{ij}|}{|r_j^- - r_{ij}| + \delta \max_i \max_j |r_j^- - r_{ij}|} \quad (19)$$

که g_{ij}^+ و g_{ij}^- به ترتیب ضرایب همبستگی خاکستری فواصل محاسبه شده برای هر معیار، از راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت و منفی و δ ضریب تمایز با مقدار بین صفر تا ۱ است. مقدار δ معمولاً برابر با ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود.

گام ۶: نرمال‌سازی مقادیر S_i^+ ، S_i^- ، G_i^+ و G_i^-

$$\tilde{S}_i^+, \tilde{S}_i^-, \tilde{G}_i^+, \tilde{G}_i^- = \frac{S_i^+, S_i^-, G_i^+, G_i^-}{\max_i \{S_i^+, S_i^-, G_i^+, G_i^-\}} \quad (20)$$

گام ۷: محاسبه شاخص نزدیکی فاصله (\tilde{S}_i) و شاخص نزدیکی شباهت (\tilde{G}_i)

$$\tilde{S}_i = \frac{\tilde{S}_i^+}{\tilde{S}_i^+ + \tilde{S}_i^-}, \quad \tilde{G}_i = \frac{\tilde{G}_i^+}{\tilde{G}_i^+ + \tilde{G}_i^-} \quad (21)$$

مقادیر \tilde{S}_i و \tilde{G}_i در دامنه صفر تا ۱ قرار می‌گیرند.

گام ۸: محاسبه شاخص تصمیم نهایی (U_i). این شاخص هر دو شاخص نزدیکی را با استفاده از مدل برنامه‌نویسی غیرخطی جمع می‌کند. مقدار U_i با مدل بهینه‌سازی غیرخطی زیر بدست می‌آید:

$$\min \sum_{i=1}^m [(\alpha_i)^2 + (\beta_i)^2] \quad (22)$$

Subject to

$$\alpha_i = U_i - \tilde{S}_i \quad i = 1, 2, \dots, m$$

که در آن، V_{za} حجم آب نفوذ یافته در منطقه‌ای که به اندازه نیاز و یا بیشتر آب دریافت کرده است (m^3)، A_d مساحت منطقه مذکور (m^2)، q متوسط دبی آبپاش مورد آزمایش (m^3/s) و t_{co} مدت زمان آبیاری در یک استقرار (s) می‌باشند.

روش ترکیبی EGC-TOPSIS

روش GC-TOPSIS از ترکیب شاخص نزدیکی روابط خاکستری برای اندازه‌گیری درجه شباهت بین توالی داده‌ها (Liu et al., 2015) و TOPSIS برای برآورد فاصله بین توالی آن داده‌ها (Hwang and Yoon, 1981) حاصل می‌شود. مراحل محاسباتی این روش به صورت زیر می‌باشد (Liu et al., 2019; Das and Chakraborty, 2020):

گام ۱: ساخت ماتریس تصمیم با m داده و n معیار (شاخص)

$$A = [a_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (23)$$

که a_{ij} نشان‌دهنده مقادیر مشاهداتی نمونه‌ها برای $i = 1, 2, \dots, m$ و $j = 1, 2, \dots, n$ می‌باشد.

گام ۲: محاسبه ماتریس تصمیم نرمال و وزن‌دهی شده

$$R = [r_{ij}]_{m \times n} = w_j \times N \quad (24)$$

که w_j وزن زامین معیار و N ماتریس تصمیم نرمال شده می‌باشد. در مطالعات قبلی برای تعیین بردار وزن‌ها از روش AHP مبتنی بر قضاوت کارشناسی افراد استفاده می‌شد. روش‌های EGC-TOPSIS و E-TOPSIS به دلیل نرمال‌سازی داده‌های مورد بررسی معیارهای ارزیابی، می‌تواند تأثیر هر معیار در رتبه‌بندی را مشخص نماید (سیفی و سروش، ۱۳۹۸). در روش ترکیبی تحقیق حاضر (EGC-TOPSIS) برای کاهش اثرات دخالت فردی در رتبه‌بندی‌ها و مرتفع نمودن این مشکل، وزن‌ها بر مبنای روش ریاضی آنتروپی شانون استخراج می‌شوند. مراحل و جزئیات محاسباتی برای تعیین وزن‌های مبتنی بر آنتروپی در قسمت بعدی ارائه شده است. بعد از تعیین وزن‌ها با آنتروپی، برای نرمال‌سازی ماتریس تصمیم از رابطه ۱۳ استفاده می‌گردد:

$$N = [n_{ij}]_{m \times n} = \frac{a_{ij}}{[\sum_{i=1}^m a_{ij}^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (25)$$

$(i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$

گام ۳: محاسبه حل‌های ایده‌آل مثبت (R^+) و منفی (R^-)

$$R^+ = \{r_1^+, r_2^+, \dots, r_n^+\} \quad (26)$$

$$R^- = \{r_1^-, r_2^-, \dots, r_n^-\} \quad (27)$$

برای معیارهای فاصله بیشتر-بهتر، از $r_j^+ = \max\{r_{ij}, i = 1, 2, \dots, m\}$ و همچنین برای معیارهای فاصله کمتر-بهتر، از $r_j^- = \min\{r_{ij}, i = 1, 2, \dots, m\}$

تمامی سامانه‌ها مقادیر DU کمتر از حد مجاز دارند. کم بودن CU، AELQ و PELQ در سامانه کلاسیک ثابت آبیاری متحرک C2 و C5، می‌تواند به دلیل کمبود فشار و دبی آبیاریها و عدم مدیریت صحیح آن باشد (شکل ۳). فشار نازل‌ها در این سامانه‌ها به ترتیب برابر با ۲ و ۲/۶ بار در زمان آزمایش اندازه‌گیری شده است. در این سامانه‌ها، با توجه به برابری مقادیر AELQ و PELQ، که بیانگر کم آبیاری در بخشی از مزرعه است، مقادیر تلفات عمقی به دلیل عدم یکنواختی توزیع مطلوب آب در سطح مزرعه بیش از ۳۰ درصد می‌باشد. علت کاهش مقادیر CU، AELQ و PELQ در سامانه C8 و W8 نیز سرعت باد زیاد به ترتیب برابر با ۷/۳ و ۱۰ متر بر ثانیه در نتیجه افزایش تلفات پاششی به ترتیب تا ۱۷ و ۱۵/۹ درصد بوده است. در سامانه C1، به دلیل مشکلات مدیریتی و بالا بودن تلفات نفوذ عمقی، مقادیر AELQ و PELQ اختلاف زیادی با یکدیگر دارند. در سامانه C7، اگرچه تلفات پاششی کم است اما سهم زیادی از تلفات به نفوذ عمقی اختصاص داده شده است. علت کم بودن راندمان این سامانه را می‌توان در فشار نامناسب آبیاریهای این سامانه جستجو کرد (شکل ۳) که ناشی از عدم مدیریت مطلوب کشاورز است. در سامانه‌های C5، C6، C7 و C9 با وجود کم آبیاری در بخشی از مزرعه (AELQ = PELQ)، نامناسب بودن فشار، باعث بالا بودن تلفات عمقی در بخشی از مزرعه شده است. استفاده از بیش از یک آبیاری بر روی لوله فرعی، استفاده از تعداد آبیاریهای بیشتر از حد مجاز و همچنین عدم توزیع نامناسب آبیاریها در سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت آبیاری متحرک، از دلایل پایین بودن عملکرد این سامانه‌ها می‌باشد (Maroufpoor et al., 2019). نتایج مطالعه عباسی و همکاران (۱۳۹۵) نشان داده است که با توجه به مقادیر پایین راندمان روش آبیاری بارانی کلاسیک ثابت، توسعه این سامانه‌ها با بررسی و دقت بیشتری انجام شود. نتایج به دست آمده با نتایج مولایی و همکاران (۱۳۹۵) مطابقت دارد. کم بودن PELQ به کم بودن یکنواختی توزیع آب و یا تلفات پاششی و یا هر دو نسبت داده می‌شود (Merkley and Allen, 2004, Faryabi et al., 2020). در سامانه‌های لوله‌های چرخدار، بجز در سامانه W3، W4 و W8 در بقیه سامانه‌ها مقادیر DU در محدوده مقادیر توصیه شده توسط مریام و کلر (۱۹۷۸) می‌باشند. کم بودن DU در سامانه‌های W3 و W8 می‌تواند به دلیل سرعت باد زیاد و در نتیجه افزایش تلفات پاششی و در سامانه W4 به دلیل ثابت نبودن فشار کارکرد آبیاریها به دلیل فرسودگی و نشت از اتصالات باشد. سامانه آبیاری بکار رفته در مزرعه، اثر مهمی بر یکنواختی توزیع آب دارد (عباسی و همکاران، ۱۳۹۵). بالا بودن دمای هوا در زمان آبیاری، نامناسب بودن فشار کارکرد آبیاری و همچنین عدم شناخت کشاورز از میزان کمبود رطوبت خاک، از دلایل بالا بودن تلفات پاششی در برخی از این سامانه و یا تلفات عمقی بوده است.

$$\beta_i = U_i - \bar{G}_i \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$\min(\bar{S}_i, \bar{G}_i) \leq U_i \leq \max(\bar{S}_i, \bar{G}_i)$$

$$0 \leq U_i \leq 1$$

بیشترین مقدار U_i به عنوان بهترین گزینه انتخاب می‌شود. برنامه‌نویسی غیرخطی به منظور جمع‌شخص‌های نزدیکی و شباهت، با ماژول Solver نرم‌افزار اکسل انجام شد.

محاسبه وزن معیارها در روش EGC-TOPSIS با تئوری آنتروپی

هدف اصلی تحقیق حاضر، تدوین روش ترکیبی آنتروپی-تحلیل روابط خاکستری-تاپسیس (EGC-TOPSIS) برای ارزیابی و رتبه‌بندی سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبیاری متحرک و چرخدار در دشت دهگلان می‌باشد. وزن معیارها تأثیر زیادی روی فرآیند تصمیم‌گیری در مورد یک موضوع دارد (Tian et al., 2018). بنابراین تعیین وزن معیارهای مورد استفاده در تحلیل EGC-TOPSIS، گام مهمی در فرآیند ارزیابی است. روش‌های زیادی برای تعیین وزن هر معیار وجود دارد که یکی از مهم‌ترین آنها، تئوری آنتروپی شانون می‌باشد. نحوه وزن‌دهی پارامترها با تئوری آنتروپی به صورت مراحل زیر است (Li et al., 2012).

گام ۱: تشکیل ماتریس تصمیم اولیه: ماتریس مورد نظر همان ماتریس مقادیر هر معیار برای هر نمونه (ماتریس A) است که در گام اول روش Topsis ساخته شد.

گام ۲: نرمال‌سازی ماتریس تصمیم اولیه

$$a_{ij} = 0.8 \times \frac{a_{ij} - (a_{ij})_{\min}}{(a_{ij})_{\max} - (a_{ij})_{\min}} + 0.1 \quad (23)$$

گام ۳: محاسبه نسبت مقدار هر پارامتر j در هر نمونه i

$$P_{ij} = a_{ij} / \sum_{i=1}^m a_{ij} \quad (24)$$

گام ۴: محاسبه آنتروپی اطلاعات

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij} \quad (25)$$

گام ۵: محاسبه وزن هر پارامتر

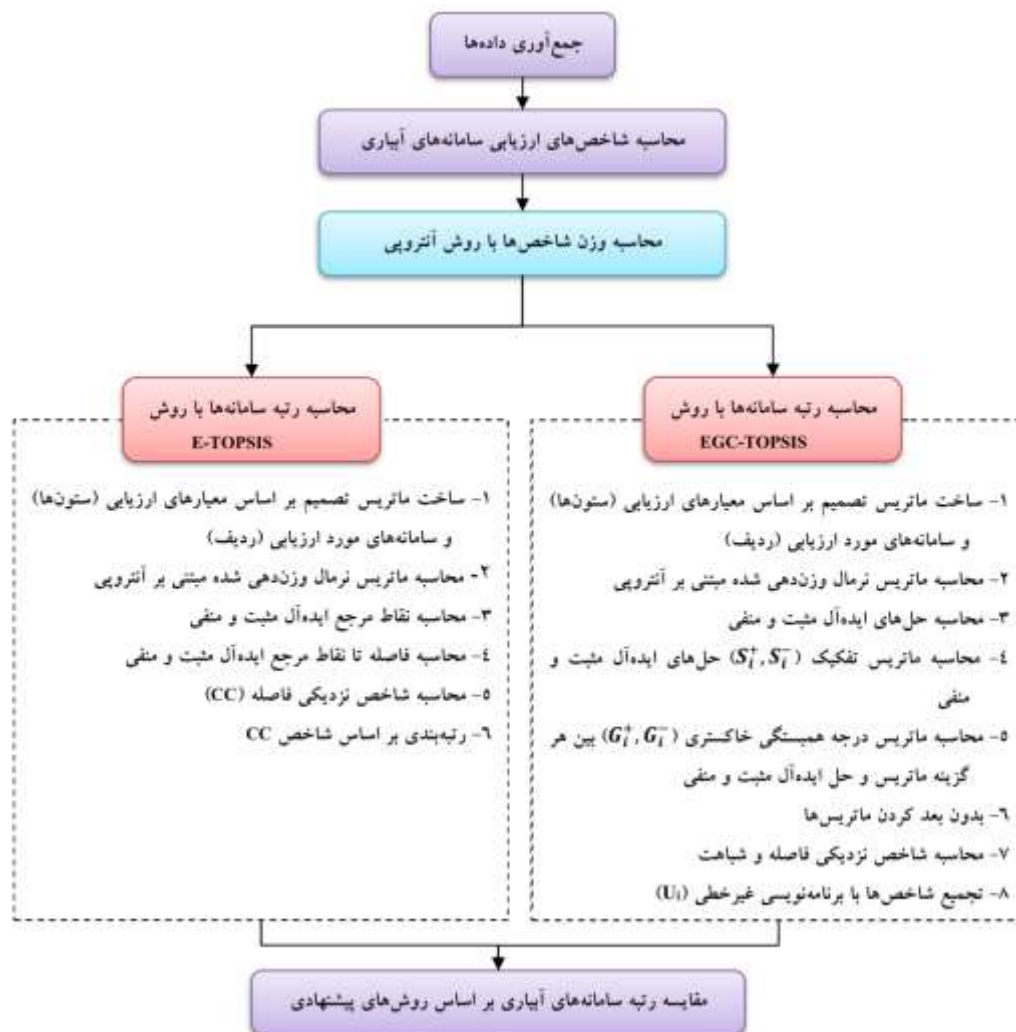
$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (26)$$

در شکل ۲، فلوجارت روش ترکیبی EGC-TOPSIS و چارچوب تحقیق به منظور رتبه‌بندی و اولویت‌دهی سامانه‌های آبیاری ارائه شده است.

نتایج و بحث

تحلیل نتایج ارزیابی سامانه‌ها

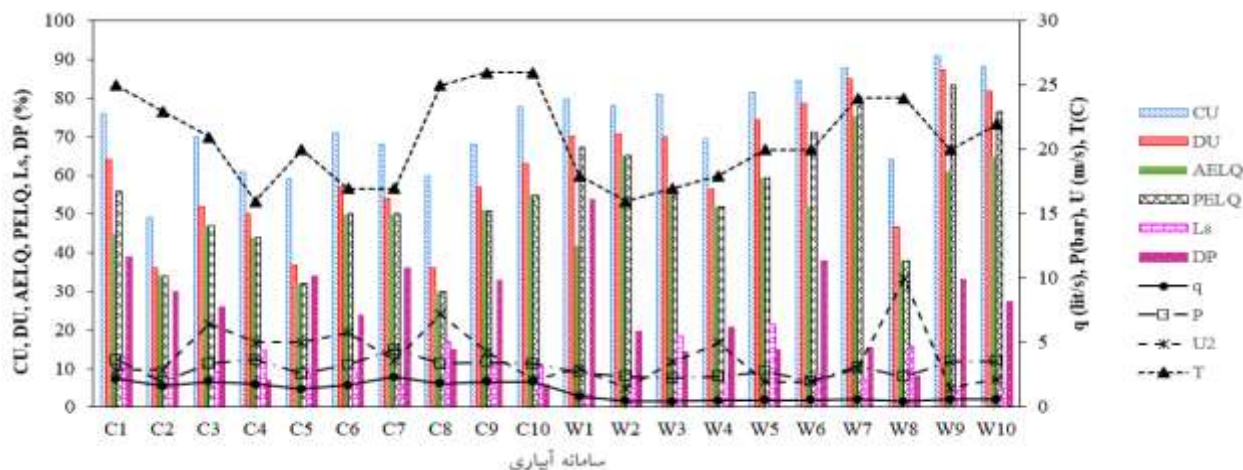
نتایج ارزیابی سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت آبیاری متحرک و لوله چرخدار در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به جدول،



شکل ۲- فلوجارت چارچوب تحقیق

جدول ۲- نتایج ارزیابی سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت آبیاری متحرک و لوله چرخ‌دار دشت دهگلان

مزرعه	CU (%)	DU (%)	AELQ (%)	PELQ (%)	L_s (%)	DP (%)	مزرعه	CU (%)	DU (%)	AELQ (%)	PELQ (%)	L_s (%)	DP (%)
C1	۷۶	۶۴	۴۵	۵۶	۱۳	۳۹	W1	۷۹/۶	۷۰/۱۲	۴۱/۸۷	۶۷/۱۹	۳/۳۷	۵۳/۸
C2	۴۹	۳۶	۳۴	۳۴	۱۰	۳۰	W2	۷۸/۱۱	۷۰/۶۷	۶۵/۰۷	۶۵/۰۷	۸/۱۸	۱۹/۶۶
C3	۷۰	۵۲	۴۷	۴۷	۹	۲۶	W3	۸۱/۰۷	۶۹/۹۶	۵۴/۹۰	۵۴/۹۰	۱۸/۵۶	۱۴/۴۷
C4	۶۱	۵۰	۴۴	۴۴	۱۵	۷	W4	۶۹/۴۵	۵۶/۳۷	۵۱/۸۵	۵۱/۸۵	۶/۳۱	۲۰/۷۸
C5	۵۹	۳۷	۳۲	۳۲	۱۰	۳۴	W5	۸۱/۵۲	۷۴/۵۲	۵۹/۴۲	۵۹/۴۲	۲۱/۶۱	۱۴/۸۴
C6	۷۱	۵۷	۵۰	۵۰	۱۰	۳۴	W6	۸۴/۶۴	۷۸/۶۰	۵۱/۸۰	۷۱/۲۷	۸/۵۳	۳۷/۹۶
C7	۶۸	۵۴	۵۰	۵۰	۶	۳۶	W7	۸۷/۹۳	۸۵/۰۹	۷۵/۲۶	۷۸/۲۲	۷/۳۸	۱۵/۴۸
C8	۶۰	۳۶	۳۰	۳۰	۱۷	۱۵	W8	۶۴/۰۴	۴۶/۸۰	۳۷/۹۷	۳۷/۹۷	۱۵/۸۵	۸/۰۱
C9	۶۸	۵۷	۵۱	۵۱	۱۱	۳۳	W9	۹۱/۱۵	۸۷/۲۷	۶۱/۰۶	۵۶	۴/۳۹	۳۳/۱۶
C10	۷۸	۶۳	۵۵	۵۵	۱۱	۶	W10	۸۸/۱۷	۸۱/۷۷	۶۴/۷۳	۳۴	۶/۳۱	۲۷/۴۹



شکل ۳- تأثیر متوسط دبی و فشار آبیاری، سرعت باد و دمای هوا روی شاخص‌های ارزیابی سامانه‌های آبیاری بارانی مورد مطالعه

یکنواختی توزیع، بیشتر از ضریب یکنواختی است که این نتیجه در توافق با مریام و کلر (۱۹۷۸) می‌باشد. در رابطه مربوط به DU به دلیل استفاده از میانگین چارک پایین به جای مقدار متوسط، یکنواختی توزیع با دقت بالاتری نسبت به CU قابل برآورد است. در واقع DU، شاخصی برای ارزیابی یکنواختی کاربرد آب در سطح مزرعه است. همچنین بسیاری از پژوهشگران، یکنواختی توزیع آب را به عنوان اولین و مهمترین شاخص ارزیابی عملکرد سامانه‌های آبیاری بارانی معرفی کرده‌اند (Dechmi et al., 2003; Liu and Kang, 2006). دو معیار AELQ و تلفات پاششی تأثیر یکسانی بر رتبه‌بندی و ارزیابی سامانه‌های آبیاری تحقیق حاضر دارند و معیار نفوذ عمقی در رتبه دوم اهمیت قرار گرفته است.

رتبه‌بندی سامانه‌های آبیاری بارانی با دو روش ترکیبی EGC-TOPSIS و Topsis

در این تحقیق، نتایج روش ترکیبی EGC-TOPSIS با نتایج حاصل از روش E-TOPSIS و رتبه‌بندی بر مبنای روش تجمیعی تجربی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج مقادیر وزنی هر معیار مورد ارزیابی بر اساس محاسبات تئوری آنتروپی در جدول ۳ ارائه شده است. معیارهایی با حداکثر وزن آنتروپی، بیشترین تأثیر را بر رتبه‌بندی سامانه‌های آبیاری دارند. معیار یکنواختی توزیع با وزن ۰/۱۹۴، بیشترین تأثیر و معیارهای ضریب یکنواختی با وزن ۰/۱۱۲ کمترین تأثیر را بر رتبه‌بندی سامانه‌های آبیاری به روش‌های EGC-TOPSIS و E-TOPSIS دارد. بر اساس تئوری آنتروپی، تأثیر معیار

جدول ۳- مقادیر وزنی حاصل از تئوری آنتروپی برای هر معیار مورد ارزیابی

معیار	CU (%)	DU (%)	AELQ (%)	PELQ (%)	Ls (%)	DP (%)	مجموع وزن‌ها
	۰/۱۱۲	۰/۱۹۴	۰/۱۵۴	۰/۱۷۷	۰/۱۷۸	۰/۱۸۵	$\sum w_i = 1$

با معادله ۲۲ برای روش ترکیبی EGC-TOPSIS محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۵ آورده شده است. در روش ترکیبی E-TOPSIS نیازی به محاسبه شاخص نزدیکی شباهت نبود و فقط شاخص نزدیکی فاصله محاسبه شد (جدول ۵). بر اساس مقادیر شاخص تصمیم نهایی ارائه شده جدول ۵، مشخص است که بیشترین مقدار این شاخص برابر با ۰/۵۸۹ برای سامانه W7 محاسبه شده است. همچنین بیشترین مقدار شاخص نزدیکی فاصله در روش E-TOPSIS برای همین سامانه برابر با ۰/۸۲۵ بدست آمد. نتایج رتبه‌بندی سامانه‌های آبیاری بارانی بر اساس روش EGC-TOPSIS نشان می‌دهد که سامانه W7 با مقادیر CU=87.93%، AELQ=75.262%، PELQ=78.22%،

با کاربرد معادلات ۱۲ و ۱۳، مقادیر ماتریس نرمال وزن‌دهی شده بدست آمد که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است. پس از آن، حل مرجع ایده‌آل مثبت و منفی به صورت $R^+ = \{0.0165, 0.0246, 0.0201, 0.0209, 0.0740, 0.0806\}$ و $R^- = \{0.0307, 0.0597, 0.0505, 0.0581, 0.0115, 0.0090\}$ برای روش‌های ترکیبی EGC-TOPSIS و E-TOPSIS محاسبه گردید. مقادیر تفکیک حل‌های ایده‌آل مثبت و منفی با معادلات ۱۶ و ۱۷ درجه همبستگی خاکستری با معادلات ۱۸ و ۱۹ محاسبه و سپس بر اساس معادله ۲۰ نرمال شدند که نتایج مقادیر نرمال شده آنها در جدول ۴ ارائه شده است. شاخص‌های نزدیکی فاصله و شباهت با معادله ۲۱ و شاخص تصمیم نهایی بر اساس برنامه‌نویسی غیرخطی

مقادیر هر معیار است. لازم به یادآوری است که روش‌های EGC-TOPSIS و E-TOPSIS، رتبه‌بندی را با توجه به وزن و تأثیر هر معیار انجام می‌دهند. اختلاف سامانه‌ها در روش‌های EGC-TOPSIS و E-TOPSIS بیانگر اثرات کاربرد روش تحلیل روابط خاکستری در روش EGC-TOPSIS است.

در شکل ۴ نمودار همبستگی پیرسون بین رتبه‌های حاصل از روش‌های EGC-TOPSIS، E-TOPSIS و E-TOPSIS ارائه شده است. شکل ۴ نشان می‌دهد که رتبه‌های دو روش EGC-TOPSIS، E-TOPSIS به طور معناداری در سطح ۹۹ درصد با مقدار R^2 برابر با ۰/۷۹ همبسته هستند. همچنین همبستگی بین رتبه‌های روش تجربی با روش‌های EGC-TOPSIS، E-TOPSIS معنادار و به ترتیب برابر با ۰/۲۱ و ۰/۵۹ بدست آمد. بنابراین نتایج نشان می‌دهند که اگرچه می‌توان از روش تجربی برای رتبه‌بندی سامانه‌های آبیاری بارانی در منطقه مورد مطالعه استفاده کرد اما به منظور ارزیابی و مدیریت بهتر سامانه‌ها بهتر است از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برپایه منطق ریاضی قوی بهره جست تا هزینه‌های حاصل از انتخاب نامناسب سامانه‌ها در منطقه کاهش یابد.

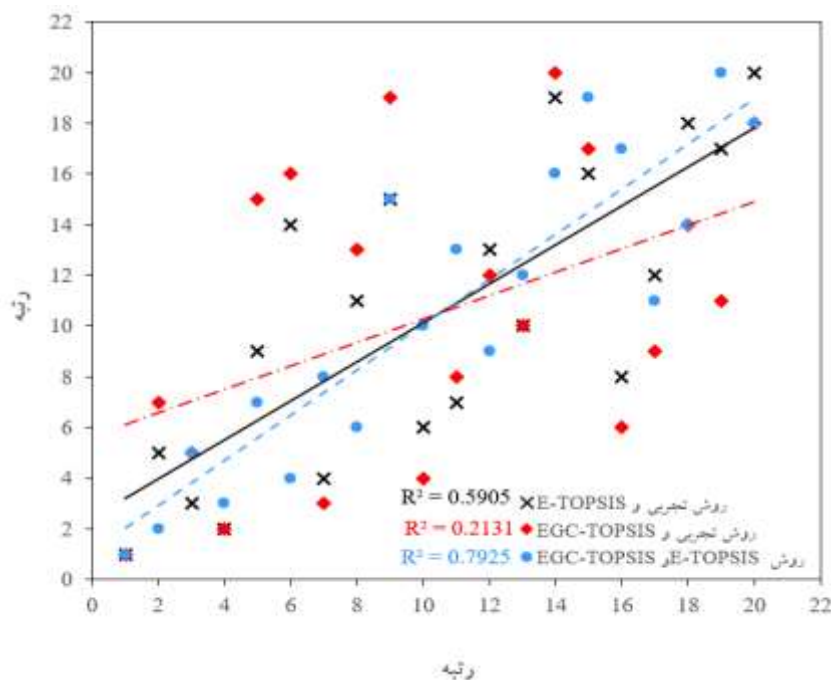
$L_s=7.38\%$ و $DP=15.48\%$ حائز رتبه اول ارزیابی می‌باشد که این نتیجه با روش‌های E-TOPSIS و تجربی نیز حاصل شد. پس از آن سامانه W2 با مقادیر $CU=78.11\%$ ، $DU=70.67\%$ ، $AELQ=65.07\%$ ، $PELQ=65.07\%$ و $L_s=8.18\%$ رتبه دوم را بر اساس روش‌های ترکیبی EGC-TOPSIS و TOPSIS بدست آورد. رتبه دوم در روش تجربی به سامانه W9 اختصاص یافت. سامانه W9 اگرچه مقادیر CU ، DU و $PELQ$ بیشتر و L_s کمتری نسبت به سامانه W9 دارد اما مقدار معیار نفوذ عمقی در سامانه W9 در حدود ۴۱٪ بیشتر از سامانه W2 است. سامانه‌های C1 و W1 در بدترین جایگاه رتبه‌بندی قرار گرفتند. بررسی مقادیر معیارها برای سامانه C1 نشان می‌دهد که مقادیر معیارهای CU ، DU ، $AELQ$ و $PELQ$ کمتر از حد استاندارد آنها قرار دارد و همچنین مقادیر معیارهای L_s و DP زیاد می‌باشد. بنابراین به نظر می‌رسد که نتایج روش‌های ترکیبی کاربردی قابل قبول‌تر از نتایج تجربی می‌باشد. از جدول ۵ مشاهده می‌شود که نتایج روش‌های ترکیبی کاربردی با منطق ریاضی قوی به یکدیگر نزدیک می‌باشند اما روش تجربی نتایج متفاوت‌تری را ارائه می‌دهد. این تغییر رتبه سامانه‌های آبیاری نسبت به روش تجربی، بیانگر اثرات نرمال‌سازی

جدول ۴- محاسبات ماتریس نرمال وزن‌دهی شده، درجه همبستگی خاکستری و تفکیک مثبت و منفی نرمال شده

مزرعه	مقادیر نرمال و وزن‌دهی شده									
	CU	DU	AELQ	PELQ	L_s	DP	\tilde{S}_i^+	\tilde{S}_i^-	درجه همبستگی خاکستری نرمال	تفکیک مثبت و منفی نرمال
									\tilde{G}_i^+	\tilde{G}_i^-
C1	۰/۰۲۵۶	۰/۰۴۳۸	۰/۰۳۰۲	۰/۰۳۹۰	۰/۰۴۴۵	۰/۰۵۸۴	۰/۰۴۷۳	۰/۰۶۷۷	۰/۰۶۷۷	۰/۰۶۳۳
C2	۰/۰۱۶۵	۰/۰۲۴۶	۰/۰۲۲۸	۰/۰۲۳۷	۰/۰۳۴۲	۰/۰۴۵۰	۰/۰۵۳۵	۰/۰۷۲۱	۰/۰۸۰۶	۰/۰۵۶۸
C3	۰/۰۲۳۶	۰/۰۳۵۶	۰/۰۳۱۶	۰/۰۳۲۸	۰/۰۳۰۸	۰/۰۳۹۰	۰/۰۶۳۶	۰/۰۵۳۹	۰/۰۶۷۱	۰/۰۶۴۴
C4	۰/۰۲۰۶	۰/۰۳۴۲	۰/۰۲۹۵	۰/۰۳۰۷	۰/۰۵۱۳	۰/۰۱۰۵	۰/۰۷۵۶	۰/۰۵۹۴	۰/۰۷۰۳	۰/۰۶۶۶
C5	۰/۰۱۹۹	۰/۰۲۵۳	۰/۰۲۱۵	۰/۰۲۲۳	۰/۰۳۴۲	۰/۰۵۱۰	۰/۰۴۹۸	۰/۰۷۵۵	۰/۰۸۰۷	۰/۰۵۶۷
C6	۰/۰۲۳۹	۰/۰۳۹۰	۰/۰۳۳۶	۰/۰۳۴۸	۰/۰۳۴۲	۰/۰۳۶۰	۰/۰۶۴۹	۰/۰۵۰۵	۰/۰۶۵۱	۰/۰۶۵۷
C7	۰/۰۲۲۹	۰/۰۳۷۰	۰/۰۳۳۶	۰/۰۳۴۸	۰/۰۲۰۵	۰/۰۴۵۰	۰/۰۶۴۳	۰/۰۵۹۲	۰/۰۶۶۹	۰/۰۶۶۰
C8	۰/۰۲۰۲	۰/۰۲۴۶	۰/۰۲۰۱	۰/۰۲۰۹	۰/۰۵۸۲	۰/۰۲۲۵	۰/۰۶۰۴	۰/۰۷۷۵	۰/۰۸۳۰	۰/۰۵۷۸
C9	۰/۰۲۲۹	۰/۰۳۹۰	۰/۰۳۴۲	۰/۰۳۵۵	۰/۰۳۷۷	۰/۰۴۹۵	۰/۰۵۴۳	۰/۰۵۹۹	۰/۰۶۷۰	۰/۰۶۳۴
C10	۰/۰۲۶۳	۰/۰۴۳۱	۰/۰۳۶۹	۰/۰۳۸۳	۰/۰۳۷۷	۰/۰۰۹	۰/۰۸۶۴	۰/۰۳۹۴	۰/۰۶۰۵	۰/۰۷۵۳
W1	۰/۰۲۶۹	۰/۰۴۸۰	۰/۰۲۸۱	۰/۰۴۶۸	۰/۰۱۱۵	۰/۰۸۰۶	۰/۰۷۲۷	۰/۰۷۶۹	۰/۰۶۹۱	۰/۰۷۲۷
W2	۰/۰۲۶۳	۰/۰۴۸۴	۰/۰۴۳۷	۰/۰۴۵۳	۰/۰۲۸۰	۰/۰۲۹۵	۰/۰۸۰۹	۰/۰۳۳۴	۰/۰۵۷۲	۰/۰۷۵۸
W3	۰/۰۲۱۳	۰/۰۴۷۹	۰/۰۳۶۹	۰/۰۳۸۳	۰/۰۶۳۵	۰/۰۲۱۷	۰/۰۶۹۴	۰/۰۶۰۰	۰/۰۶۴۷	۰/۰۶۹۶
W4	۰/۰۲۳۴	۰/۰۳۸۶	۰/۰۳۴۸	۰/۰۳۶۱	۰/۰۲۱۶	۰/۰۳۱۱	۰/۰۷۶۷	۰/۰۴۲۷	۰/۰۶۳۳	۰/۰۶۹۵
W5	۰/۰۲۷۵	۰/۰۵۱۰	۰/۰۳۹۹	۰/۰۴۱۴	۰/۰۷۴۰	۰/۰۲۲۲	۰/۰۷۱۰	۰/۰۶۷۵	۰/۰۶۶۷	۰/۰۷۱۱
W6	۰/۰۲۸۶	۰/۰۵۳۸	۰/۰۳۴۸	۰/۰۴۹۷	۰/۰۲۹۲	۰/۰۵۶۹	۰/۰۶۷۹	۰/۰۵۴۵	۰/۰۶۰۲	۰/۰۷۳۴
W7	۰/۰۲۹۷	۰/۰۵۸۳	۰/۰۵۰۵	۰/۰۵۴۵	۰/۰۲۵۳	۰/۰۲۳۲	۰/۰۹۵۰	۰/۰۲۰۲	۰/۰۵۱۹	۰/۰۸۸۰
W8	۰/۰۲۱۶	۰/۰۳۲۰	۰/۰۲۵۵	۰/۰۲۶۵	۰/۰۵۴۳	۰/۰۱۲۰	۰/۰۷۲۴	۰/۰۶۵۷	۰/۰۷۳۸	۰/۰۶۴۳
W9	۰/۰۳۰۷	۰/۰۵۹۷	۰/۰۴۱۰	۰/۰۵۸۱	۰/۰۱۵۰	۰/۰۴۹۷	۰/۰۸۷۶	۰/۰۴۱۹	۰/۰۵۴۳	۰/۰۸۶۲
W10	۰/۰۲۹۷	۰/۰۵۶۰	۰/۰۴۳۵	۰/۰۵۳۳	۰/۰۲۱۶	۰/۰۴۱۲	۰/۰۸۴۰	۰/۰۳۵۰	۰/۰۵۴۶	۰/۰۸۱۷

جدول ۵- شاخص نزدیکی فاصله (\bar{G}_i و CC)، شاخص نزدیکی شباهت (\bar{G}_i) و شاخص تصمیم نهایی (U_i) و رتبه سامانه‌های آبیاری

رتبه	TOPSIS			GC-TOPSIS			مزرعه	رتبه	TOPSIS			GC-TOPSIS			مزرعه
	رتبه	CC	رتبه	U_i	\bar{G}_i	\bar{S}_i			رتبه	رتبه	CC	رتبه	U_i	\bar{G}_i	
۹	۱۵	۰/۴۸۶	۱۹	۰/۴۶۹	۰/۵۰۲	۰/۴۳۵	W1	۱۴	۱۹	۰/۴۱۱	۲۰	۰/۴۴۷	۰/۵۳۱	۰/۳۶۳	C1
۴	۲	۰/۷۱۴	۲	۰/۵۵۸	۰/۴۴۴	۰/۶۷۱	W2	۱۸	۱۸	۰/۴۲۶	۱۴	۰/۴۸۹	۰/۶۰۱	۰/۳۷۷	C2
۸	۱۱	۰/۵۲۷	۱۳	۰/۴۹۱	۰/۴۹۶	۰/۴۸۶	W3	۱۳	۱۰	۰/۵۴۱	۱۰	۰/۵۰۷	۰/۵۲۵	۰/۴۹۰	C3
۱۰	۶	۰/۶۴۲	۴	۰/۵۴۳	۰/۴۹۱	۰/۵۹۴	W4	۱۶	۸	۰/۵۶۰	۶	۰/۵۱۹	۰/۵۲۸	۰/۵۰۹	C4
۶	۱۴	۰/۵۱۳	۱۶	۰/۴۸۰	۰/۴۹۸	۰/۴۶۲	W5	۲۰	۲۰	۰/۳۹۷	۱۸	۰/۴۷۵	۰/۶۰۱	۰/۳۵۰	C5
۵	۹	۰/۵۵۵	۱۵	۰/۴۸۵	۰/۴۶۵	۰/۵۰۴	W6	۱۱	۷	۰/۵۶۳	۸	۰/۵۱۲	۰/۵۱۲	۰/۵۱۲	C6
۱	۱	۰/۸۲۵	۱	۰/۵۸۹	۰/۳۸۵	۰/۷۹۴	W7	۱۲	۱۳	۰/۵۲۰	۱۲	۰/۴۹۴	۰/۵۱۸	۰/۴۷۰	C7
۱۷	۱۲	۰/۵۲۴	۹	۰/۵۱۱	۰/۵۴۹	۰/۴۷۳	W8	۱۹	۱۷	۰/۴۳۸	۱۱	۰/۴۹۶	۰/۶۰۳	۰/۳۸۹	C8
۲	۵	۰/۶۷۶	۷	۰/۵۱۵	۰/۴۰۰	۰/۶۳۰	W9	۱۵	۱۶	۰/۴۷۶	۱۷	۰/۴۷۷	۰/۵۲۸	۰/۴۲۵	C9
۳	۳	۰/۷۰۶	۵	۰/۵۳۸	۰/۴۱۵	۰/۶۶۲	W10	۷	۴	۰/۶۸۷	۳	۰/۵۵۱	۰/۴۶۰	۰/۶۴۲	C10



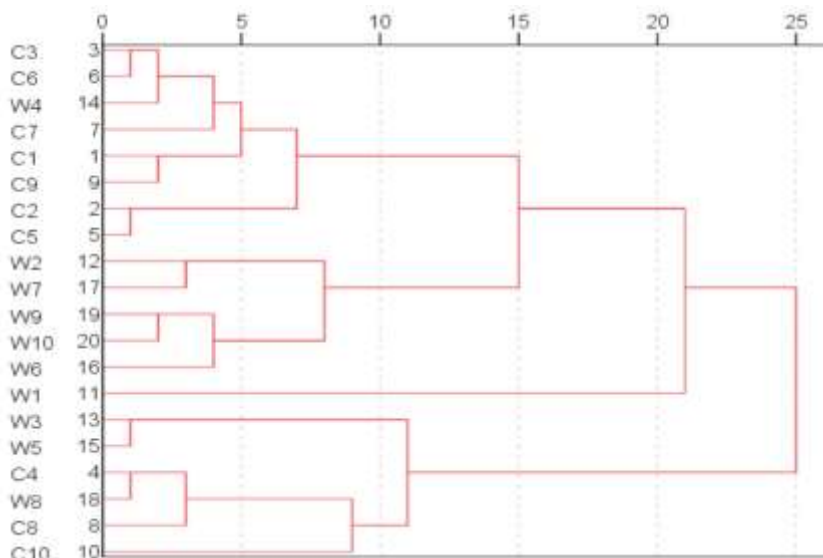
شکل ۴- نمودار همبستگی رتبه‌های حاصل از روش‌های مختلف برای سامانه‌های آبیاری بارانی

E-TOPSIS دارد. بنابراین بر اساس روش‌های رتبه‌بندی مبتنی بر شاخص‌های ارزیابی راندمان مورد بررسی در دشت دهگلان، سامانه‌های لوله چرخدار ارجح بر سامانه‌های آبیاری کلاسیک ثابت آبپاش متحرک می‌باشند. میانگین رتبه‌های حاصل برای سامانه‌های لوله چرخدار با روش‌های EGC-TOPSIS، E-TOPSIS و تجربی به ترتیب برابر با ۹/۱، ۷/۸ و ۶/۵ و برای سامانه‌های کلاسیک ثابت آبپاش متحرک برابر با ۱۱/۹، ۱۳/۲ و ۱۴/۵ بدست آمد. سامانه لوله چرخدار از نوع ماشین‌های آبیاری می‌باشند که دخالت کشاورز در آنها نسبت به سامانه‌های کلاسیک کمتر می‌باشد. نتایج به دست آمده با روش ترکیبی GC-TOPSIS که روشی ساده و قوی بوده با نتایج

در شکل ۵ نمودار دندوگرام تحلیل خوشه‌ای سامانه‌ها آورده شده است. سامانه‌های آبیاری C1، C2، C3، C5، C6، C7، C9 و W4 در یک خوشه قرار گرفته‌اند. این خوشه شامل رتبه‌های ۴، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۷ و ۱۸ بر اساس روش EGC-TOPSIS و شامل رتبه‌های ۶، ۷، ۱۰، ۱۳، ۱۶، ۱۸، ۱۹ و ۲۰ بر اساس روش E-TOPSIS می‌باشد که معیارهای ارزیابی به لحاظ مقدار عددی، بیشترین شباهت را به یکدیگر دارند. سامانه‌های W2، W6، W7، W9 و W10 در خوشه دوم، W1 در خوشه سوم و سامانه‌های C4، C8، C10، W3، W5 و W8 در خوشه چهارم قرار گرفتند. این روش خوشه‌بندی، در مرتبه اول شباهت زیادی به روش رتبه‌بندی تجربی و سپس به روش

آپاش متحرک به عنوان بهترین سامانه برای شرایط موجود مزارع دشت دهگلان قابل انتخاب می‌باشد، اما سامانه کلاسیک ثابت آپاش متحرک، نتایج قابل قبولی در منطقه نداشتند که می‌تواند به دلیل مشکلات طراحی و اجرا و همچنین ضعف در مدیریت و بهره‌برداری آنها باشد (Maroufpoor et al., 2019؛ مولایی و همکاران، ۱۳۹۵).

فاریابی و همکاران (۲۰۲۰) مطابقت دارد. ضیایی و همکاران (۱۳۷۹) نیز سامانه آبیاری بارانی چرخدار را به عنوان گزینه بهتر نسبت به سامانه‌های کلاسیک ثابت و کلاسیک نیمه‌متحرک در استان فارس ارزیابی کردند. اگرچه در تحقیق قره‌داغی و همکاران (۱۳۹۰) با استفاده از اطلاعات آب، خاک، اقلیم و عوامل اقتصادی-اجتماعی و روش AHP نشان دادند که سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت



شکل ۵- دندوگرام حاصل از تحلیل خوشه‌ای سامانه‌های آبیاری بارانی

آمد. با توجه به اینکه همبستگی بالایی بین متغیرهای ورودی مورد استفاده وجود دارد، بنابراین برای از بین بردن این مشکل و بررسی رابطه بین شاخص‌های تصمیم نهایی و شاخص نزدیکی فاصله با دیگر معیارهای ارزیابی، از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی استفاده شد. برای بررسی امکان اجرای PCA از آزمون بارتلت و ضریب KMO استفاده شد. مقدار $KMO=0/551$ و آزمون بارتلت برابر با $176/9$ و معنادار در سطح 95% بدست آمد که امکان اجرای PCA را تأیید کرد. برای اجرای این روش، از داده‌های نرمال شده معیارهای ورودی استفاده و ماتریس متقارن همبستگی مرتبه 6×6 تشکیل شد که نتایج آن در جدول ۷ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که سه مؤلفه اول قادر به توجیه $97/6\%$ از کل واریانس موجود در داده‌ها می‌باشند. تغییرات مقادیر ویژه در مقابل شماره مؤلفه‌ها نشان داد که برای مؤلفه‌های چهارم به بعد، نمودار واریزه‌ای به صورت افقی شده و بنابراین سه مؤلفه اول به عنوان مؤلفه‌های اصلی بیانگر داده‌های ورودی انتخاب شدند (شکل ۶). پس از تعیین مؤلفه‌های اصلی، مقادیر بردارهای ویژه که ضرایب هر مؤلفه را برای محاسبه آنها تعیین می‌کند، استخراج شد و سه مؤلفه به صورت رابطه بدست آمد.

توسعه روابط بر اساس تحلیل همبستگی، تحلیل مؤلفه‌های اصلی و رگرسیون خطی چندگانه

در این تحقیق، به منظور بررسی رابطه بین شاخص تصمیم نهایی روش EGC-TOPSIS و شاخص نزدیکی فاصله در روش E-TOPSIS از تحلیل همبستگی، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و رگرسیون خطی چندگانه (MLR) با استفاده از نرم‌افزار SPSS استفاده شد. در جدول ۶ ماتریس همبستگی معیارهای ارزیابی سامانه‌های آبیاری بارانی و شاخص‌های تصمیم نهایی و نزدیکی فاصله ارائه شده است. این ماتریس نشان می‌دهد که بیشترین همبستگی بین شاخص DU با شاخص‌های CU و PELQ و کمترین آن بین DP و CU می‌باشد. همبستگی بین شاخص‌های CU، DU، AELQ و PELQ در سطح 99% معنادار بود اما همبستگی بین این شاخص‌ها با Ls غیرمعنادار و منفی بدست آمد. بنابراین نتایج نشان می‌دهند که با افزایش دیگر معیارهای ارزیابی، شاخص تلفات پاششی کاهش می‌یابد. شاخص تصمیم نهایی با معیارهای CU، DU و AELQ همبستگی معنادار در سطح 99% و بالاتر از $0/65$ داشت. همچنین شاخص نزدیکی فاصله با معیارهای ارزیابی AELQ و DP همبستگی بالا و معناداری نشان داد. همبستگی بین دو شاخص U و CC بالا و معنادار بود و ضریب همبستگی آنها برابر با $0/91$ بدست

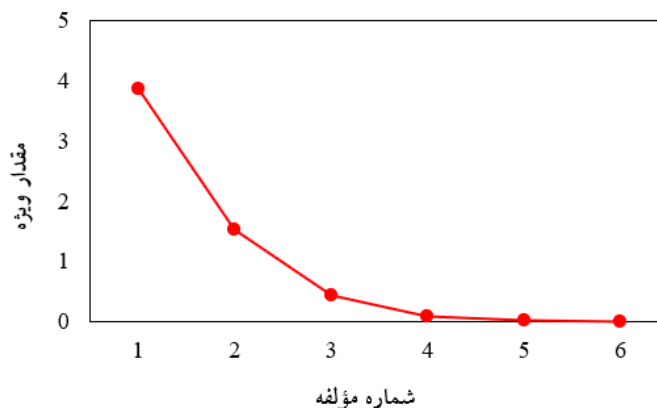
جدول ۶- ماتریس همبستگی معیارهای ارزیابی با شاخص‌های تصمیم‌نهایی روش EGC-TOPSIS و شاخص نزدیکی فاصله روش E-TOPSIS

شاخص	CU	DU	AELQ	PELQ	Ls	DP	U	CC
CU	۱	-۰/۹۷۳**	-۰/۸۱۸**	-۰/۹۳۸**	-۰/۲۵۱	-۰/۱۱۴	۰/۶۴۷**	۰/۳۹۶
DU		۱	-۰/۸۶۴**	-۰/۹۷۷**	-۰/۲۸۱	-۰/۱۳۳	۰/۶۷۳**	۰/۳۱۶
AELQ			۱	-۰/۸۳۹**	-۰/۲۴۱	-۰/۱۶۱	-۰/۸۵۵**	۰/۶۲۷**
PELQ				۱	-۰/۴۶۳*	-۰/۲۴۳	۰/۶۹۷*	۰/۳۵۰
Ls					۱	-۰/۵۹۸**	-۰/۳۷۶	-۰/۲۷۳
DP						۱	-۰/۳۵۷	-۰/۵۶۰*
U							۱	۰/۹۱۰**
CC								۱

جدول ۷- مشخصات مؤلفه‌های حاصل از معیارهای اولیه مورد ارزیابی

مؤلفه‌ها	مقدار هر مؤلفه از ۶	درصد اطلاعات متغیرهای اولیه	درصد تجمعی اطلاعات متغیرهای اولیه
۱	۳/۸۷۶	۶۴/۶۰۲	۶۴/۶۰۲
۲	۱/۵۲۸	۲۵/۴۷۴	۹۰/۰۷۶
۳	۰/۴۵۲	۷/۵۳۱	۹۷/۶۰۶
۴	۰/۱۰۶	۱/۷۷۰	۹۹/۳۷۶
۵	۰/۰۳۶	۰/۵۹۵	۹۹/۹۷۱
۶	۰/۰۰۲	۰/۰۲۹	۱۰۰

Scree Plot



شکل ۶- نمودار واریزه‌ای معیارهای مورد ارزیابی سامانه‌های آبیاری

وارد شدند. معادله رگرسیون خطی چندگانه با وارد کردن سه مؤلفه اصلی به صورت معادلات ۲۸ برای شاخص تصمیم‌نهایی روش ترکیبی EGC-TOPSIS و شاخص نزدیکی فاصله روش ترکیبی E-TOPSIS به دست آمد:

$$U_i = 0.052PC1_i + 0.095PC2_i - 0.713PC3_i + 0.596 \quad (28)$$

$$CC_i = 0.382PC1_i + 0.311PC2_i - 1.705PC3_i + 0.561$$

مقدار آماره t برای مؤلفه‌های PC1، PC2 و PC3 و مقدار ثابت،

$$PC1_i = 0.953CU_i + 0.978DU_i + 0.881AELQ_i + 0.991PELQ_i - 0.456Ls_i - 0.212DP_i \quad (27)$$

$$PC2_i = 0.151CU_i + 0.134DU_i + 0.332AELQ_i - 0.032PELQ_i + 0.752Ls_i - 0.9DP_i$$

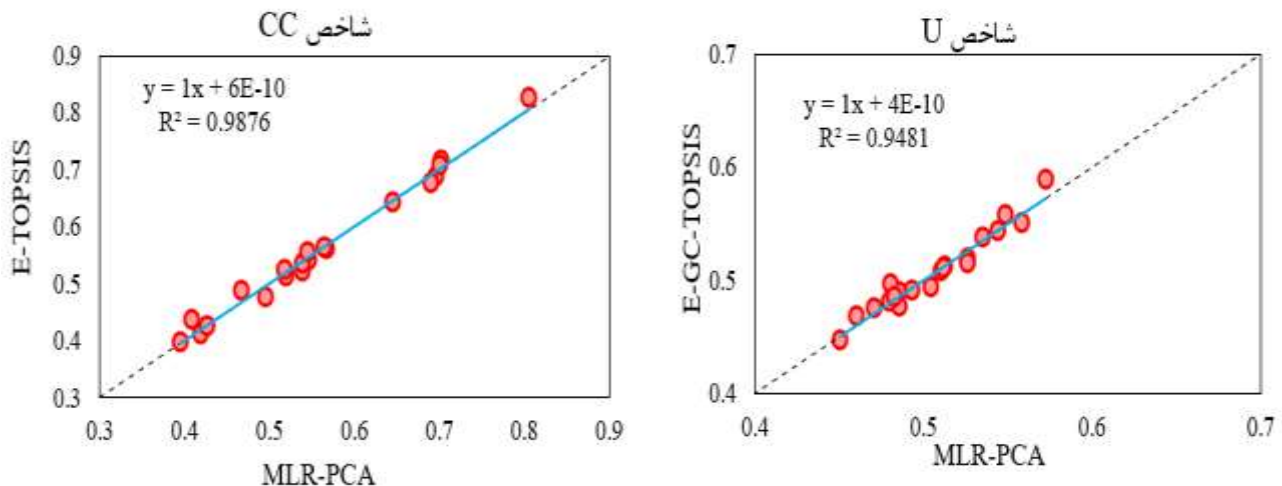
$$PC3_i = 0.181CU_i + 0.141DU_i - 0.232AELQ_i + 0.033PELQ_i + 0.467Ls_i + 0.355DP_i$$

پس از تشکیل معادلات مؤلفه‌های اصلی، مقادیر PC1، PC2 و

PC3 محاسبه و به عنوان ورودی به مدل رگرسیون خطی چندگانه

درصد معنادار می‌باشند.

نمودار همبستگی مقادیر پیش‌بینی U و CC توسط مدل EGC-TOPSIS با مقادیر محاسباتی حاصل از روش‌های EGC-TOPSIS و E-TOPSIS در شکل ۷ ارائه شده است. مقادیر R^2 دو نمودار بیانگر توانایی مدل ترکیبی MLR-PCA و دقت مطلوب آن در پیش‌بینی شاخص‌های تصمیم‌نهایی و نزدیکی فاصله می‌باشد.



شکل ۷- نمودار همبستگی روش MLR-PCA با EGC-TOPSIS و E-TOPSIS در تخمین مقادیر شاخص‌های U و CC

ترکیبی MLR-PCA نشان داد که این مدل دقت مطلوبی در پیش‌بینی شاخص‌های مورد نیاز برای رتبه‌بندی سامانه‌های آبیاری دارد. به نظر می‌رسد روش‌های ترکیبی EGC-TOPSIS و E-TOPSIS ابزارهای تصمیم‌گیری کارآمد با پشتوانه ریاضی قوی برای انتخاب سامانه‌های آبیاری باشند. این امر به ویژه زمانی اهمیت خود را نشان می‌دهد که نیاز به تصمیمات مستقلی برای هر منطقه با پشتوانه قوی علمی و تأیید تصمیم‌گیری‌ها وجود داشته باشد. روش‌های ترکیبی مورد استفاده در تحقیق حاضر، این امکان را به تصمیم‌گیرنده می‌دهند تا از مجموعه گسترده‌ای از عوامل مؤثر بر انتخاب سامانه‌های آبیاری استفاده کند بدون اینکه هیچ دخالتی در وزن‌دهی عوامل داشته باشد. بنابراین مدل پیشنهادی، مدلی جامع و کامل است که می‌تواند در انتخاب سامانه‌های مناسب آبیاری در هر منطقه و در نتیجه بهره‌گیری مفیدتر از منابع آب و خاک مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

آذر، ع.، و رجب‌زاده، ع. ۱۳۸۱. تصمیم‌گیری کاربردی؛ رویکرد M.A.D.M. نشر نگاه دانش، تهران.
آذربو، ن.، معروف‌پور، ع.، فرزنان‌کیا، ف.، و رستمیان، ب. ۱۳۹۵.

مربوط به شاخص تصمیم‌نهایی به ترتیب برابر با ۵/۰۸، ۶/۶۱، ۱۳/۸۱- و ۴۰/۷۹ و برای شاخص نزدیکی فاصله به ترتیب برابر با ۲۳/۱۷، ۱۳/۳۴، ۲۰/۳- و ۲۳/۶۲ تعیین گردید. با استفاده از جدول t-test و برای سطح معناداری ۵ درصد و درجه آزادی ۱۹، مقدار t برابر با ۱/۸۳۳ می‌باشد. مقایسه قدرمطلق مقادیر t بدست آمده توسط مدل و مقدار ۲/۸۶۱ نشان می‌دهد که تمامی ضرایب در سطح ۹۹

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به منظور مقایسه سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش متحرک و لوله‌های چرخدار و رتبه‌بندی آنها بر اساس شاخص‌های ارزیابی عملکرد آنها در دشت دهگلان استان کردستان با استفاده از روش‌های ترکیبی آنترپی-تحلیل روابط خاکستری-تاپسیس (EGC-TOPSIS) و آنترپی-تاپسیس (E-TOPSIS) انجام شد. همچنین روابط ساده و کاربردی محاسبه شاخص‌های تصمیم‌نهایی و نزدیکی فاصله برای اولویت‌دهی سامانه‌های آبیاری با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی-رگرسیون خطی چندگانه (MLE-PCA) توسعه داده شد. در روش‌های ترکیبی EGC-TOPSIS و E-TOPSIS برای مقایسه و رتبه‌بندی سامانه‌های آبیاری، از معیارهای DU، AELQ، PELQ، CU، Ls و DP استفاده شد. نتایج تئوری آنترپی نشان داد که یکنواختی توزیع بیشترین تأثیر و معیار ضریب یکنواختی کمترین تأثیر را بر رتبه‌بندی سامانه‌های آبیاری دارند. به طور کلی نتایج نشان داد که روش‌های رتبه‌بندی ترکیبی مورد استفاده در پژوهش حاضر، نتایج نزدیکی را ایجاد می‌کنند. همچنین رتبه‌های حاصل از این روش‌ها و تحلیل خوشه‌ای بیانگر برتری سامانه آبیاری بارانی لوله چرخدار نسبت به کلاسیک ثابت آبپاش متحرک در دشت دهگلان بود. نتایج مدل

تحلیل سلسله مراتبی در اراضی سازمان اتکا در منطقه دورود. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. ۲۸(۴): ۶۴۹-۷۵۸.

عباسی، ف.، فرزادمهر، ج.، چپی، ک.، بشیری، م. و آذرخشی، م. ۱۳۹۵. تغییرات زمانی و مکانی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی دشت قروه و دهگلان و ارتباط آن با خشکسالی. هیدروژئولوژی. ۲(۲): ۱۱-۲۳.

عباسی، ف.، سهراب، ف.، و عباسی، ن. ۱۳۹۵. ارزیابی وضعیت راندمان آب آبیاری در ایران. تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی. ۱۷(۶۷): ۱۱۳-۱۲۸.

علیزاده، ا. ۱۳۹۰. طراحی سیستم‌های آبیاری: طراحی سیستم‌های آبیاری تحت فشار. جلد دوم، انتشارات دانشگاه امام رضا، ۳۶۸ صفحه.

فاریابی، ا.، معروف‌پور، ع.، و قمرنیا، ه. ۱۳۸۹. بررسی و ارزیابی سیستم‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت دشت دهگلان کردستان. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک. ۱(۵۴): ۱-۱۵.

فرزان‌کیا، ف.، معروف‌پور، ع.، رستمیان، ب.، و آذربو، ن. ۱۳۹۳. بررسی یکنواختی توزیع آب برخی آبپاش‌های ضربه‌ای در سیستم آبیاری بارانی کلاسیک ثابت در شرایط مختلف جوی و هیدرولیکی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۸(۳): ۵۱۹-۵۲۷.

قره‌داغی، م. م.، معروف‌پور، ع.، بابایی، خ.، و پاشازاده، م. ۱۳۹۰. کاربرد فرایند تحلیل سلسله مراتبی در انتخاب سیستم‌های آبیاری تحت فشار (مطالعه موردی: دشت دهگلان کردستان). علوم و مهندسی آبیاری (مجله علمی کشاورزی). ۳۴(۲): ۹۵-۱۰۶.

قره‌داغی، م. م.، معروف‌پور، ع.، بابایی، خ.، و منصوری، ف. ۱۳۹۲. پتانسیل‌یابی مناطق مستعد جهت اجرای سیستم‌های آبیاری تحت فشار با استفاده از GIS (مطالعه موردی: شبکه آبیاری و زهکشی باباخان). نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۷(۶): ۱۱۱۱-۱۱۲۲.

کهنسال، م.، و رفیعی، ه. ۱۳۸۷. انتخاب و رتبه‌بندی آبیاری بارانی و سنتی در استان خراسان رضوی. مجله علوم و صنایع کشاورزی، ویژه اقتصاد و توسعه کشاورزی. ۲۲(۱): ۹۱-۱۰۴.

مجدسلیمی، ک.، صلواتیان، س.ب.، و امیری، ا. ۱۳۹۴. ارزیابی فنی سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک اجرا شده در باغ‌های چای

بررسی دقت برخی از مدل‌های برآورد تلفات ناشی از تبخیر و باد در سیستم آبیاری بارانی کلاسیک ثابت. مجله پژوهش آب ایران. ۱۰(۲): ۴۷-۵۴.

احمدی، ا.، هزارجریبی، ا.، قربانی، خ.، و حسام، م. ۱۳۹۷. مکان‌یابی نواحی مستعد اجرای سامانه‌های نوین آبیاری (موضوعی-بارانی-کم‌فشار) با تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در GIS (مطالعه موردی: شهرستان اسفراین-خراسان شمالی). نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۵(۵): ۶۹-۸۷.

بی‌نام. ۱۳۸۵. مطالعات امکان‌سنجی توسعه روش‌های آبیاری تحت فشار در استان کرمانشاه. دفتر بهبود و توسعه آبیاری تحت فشار، جلد ۲، انتخاب سیستم‌های مناسب در پهنه‌های مستعد.

پورمحسنی، ع. ۱۳۷۷. بررسی وضعیت و عملکرد آبیاری بارانی در استان خوزستان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

تیموری، م.، بردی شیخ، و.، و سعدالدین، ا. ۱۳۹۷. ارزیابی و مقایسه کیفیت آب با استفاده از روش‌های تحلیل رابطه خاکستری و NSFQWI در مخزن سد شیرین دره. مجله سلامت و محیط زیست. ۲(۲): ۱۶۹-۱۸۲.

دلبری، م.، افراسیاب، پ. و میرعمادی، س.ر. ۱۳۸۹. تجزیه و تحلیل تغییرات مکانی-زمانی شوری و عمق آب زیرزمینی (مطالعه موردی: استان مازندران). نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۴(۳): ۳۵۹-۳۷۴.

رستمیان، ب.، معروف‌پور، ع.، آذربو، ن.، و فرزان‌کیا، ف. ۱۳۹۳. بررسی اثر عوامل جوی و هیدرولیکی بر میزان تلفات تبخیر و باد آبپاش‌های ضربه‌ای در سیستم آبیاری بارانی کلاسیک ثابت. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۸(۴): ۶۶۱-۶۶۹.

سالمی، ح.، و رضوانی، س.م. ۱۳۹۵. ارزیابی فنی سیستم آبیاری بارانی در شرایط زارعین (استان اصفهان و همدان). نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۳(۳): ۳۴۵-۳۵۰.

سیفی، ا.، و سروش، ف. ۱۳۹۸. روش ترکیبی تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس با آنتروپی برای رتبه‌بندی کیفیت و ریسک آلودگی آب‌های زیرزمینی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران ۱۳(۳): ۶۹۹-۷۱۴.

صدیق‌کیا، م.، ناطقی، م.ب.، کاویانی کوثرخیزی، ش. و نقی‌پور، ن. ۱۳۹۳. ارزیابی و جانمایی انواع روش‌های آبیاری با الگوی

- Boran, K. 2017. An evaluation of power plants in Turkey: Fuzzy TOPSIS method. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*. 12(2): 119-125.
- Cevik Onar, S., Oztaysi, B. and Kahraman, C. 2014. Strategic decision selection using hesitant fuzzy TOPSIS and interval type-2 fuzzy AHP: a case study. *International Journal of Computational Intelligence Systems*. 7(5): 1002-1021.
- Chang, H.K., Liou, J.C. and Chen, W.W. 2012. Protection priority in the coastal environment using a hybrid ahp-topsis method on the Miaoli coast, Taiwan. *Journal of Coastal Research*. 28(2): 369-374.
- Christiansen, J.E. 1942. Irrigation by sprinkling. *California agricultural experiment station bulletin* 670. University of California, Berkeley, CA, 4275.
- Chung, E.S., Hong, W.P., Lee, K.S. and Burian, S.J. 2011. Integrated use of a continuous simulation model and multi-attribute decision-making for ranking urban watershed management alternatives. *Water resources management*. 25(2): 641-659.
- Cobban, S. 1995. An evaluation of the floppy sprinkler with reference to the rotary impact sprinkler for the irrigation of tea in East Africa. Unpublished M. Sc. Thesis. Cranfield University, Silsoe College, UK.
- Conrad, C., Dech, S.W., Hafeez, M., Lamers, J., Martius, C. and Strunz, G. 2007. Mapping and assessing water use in a Central Asian irrigation system by utilizing MODIS remote sensing products. *Irrigation and Drainage Systems*. 21(3-4): 197-218.
- Dai, J., Qi, J., Chi, J., Chen, S., Yang, J., Ju, L. and Chen, B. 2010. Integrated water resource security evaluation of Beijing based on GRA and TOPSIS. *Frontiers of Earth Science in China*. 4(3): 357-362.
- Darouich, H.M., Pedras, C.M., Gonçalves, J.M. and Pereira, L.S. 2014. Drip vs. surface irrigation: A comparison focussing on water saving and economic returns using multicriteria analysis applied to cotton. *Biosystems Engineering*. 122: 74-90.
- Das, P.P. and Chakraborty, S. 2020. A grey correlation-based TOPSIS approach for optimization of surface roughness and micro hardness of Nitinol during WEDM operation. *Materials Today: Proceedings*.
- Dechmi, F., Playán, E., Caverio, J., Faci, J.M. and Martínez-Cob, A. 2003. Wind effects on solid set sprinkler irrigation depth and yield of maize (*Zea mays*). *Irrigation Science*. 22(2): 67-77.
- استان گیلان. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۳۴۹-۳۳۶: (۲)۲۹.
- مجنونی هریس، ا، نایبی، م. و صدرالدینی، ع. ۱۳۹۶. انتخاب مناسب‌ترین سیستم آبیاری در دشت‌های فامنین، قهاوند و رزن. *علوم و مهندسی آبیاری*. ۴۰(۴): ۱۵۵-۱۶۷.
- مشرفی، گ. ی، معروف‌پور، ع، و قمرنیا، ه. ۱۳۹۰. ارزیابی سیستم‌های آبیاری بارانی لوله چرخدار دشت دهگلان کردستان. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*. ۵(۱): ۹۲-۱۰۳.
- مولایی، ز، معروف‌پور، ع، و ملکی، ع. ۱۳۹۵. بررسی و ارزیابی فنی برخی سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت دشت کوهدشت. *مجله پژوهش آب ایران*. ۱۰(۲): ۱۲۵-۱۳۲.
- ناصری، ا، عباسی، ف، و اکبری، م. ۱۳۹۶. برآورد آب مصرفی در بخش کشاورزی به روش بیلان آب. *تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی*. ۱۸(۶۸): ۱۷-۳۳.
- نصیری قیداری، ا، منتظر، ع. ا، و مؤمنی، م. ۱۳۸۹. کاربرد ترکیبی فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و تکنیک تاپسیس در تعیین ارزش وزنی معیارها و ارزیابی عملکرد شبکه‌های آبیاری و زهکشی (مطالعه موردی: نواحی سه‌گانه شبکه آبیاری سفیدرود). *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*. ۴(۲): ۲۸۴-۲۹۶.
- نیک‌مهر، س، و زیبایی، م. ۱۳۹۵. ارزیابی طرح‌های آبیاری و زهکشی استان خوزستان: کاربرد تحلیل سلسله مراتبی فازی و روش تاپسیس. *اقتصاد کشاورزی*. ۱۰(۲): ۱۷۳-۱۹۰.
- وردی‌نژاد، و، رشیدی، م. س، معروف‌پور، ع، رضایی، ح. و سرابی، ج. ۱۳۹۶. بررسی آزمایشگاهی افت فشار موضعی شیرهای خودکار در سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبیاش متحرک. *تحقیقات آب و خاک ایران*. ۴۸(۲): ۴۵۱-۴۶۱.
- هادی‌زاده، ع. ۱۳۸۵. ارائه روشی در گزینش سیستم آبیاری مناسب. *مجموعه مقالات همایش مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی*. دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران.
- Afshar, A., Mariño, M.A., Saadatpour, M. and Afshar, A. 2011. Fuzzy TOPSIS multi-criteria decision analysis applied to Karun reservoirs system. *Water Resources Management*. 25(2): 545-563.
- Behzadian, M., Otaghsara, S.K., Yazdani, M. and Ignatius, J. 2012. A state-of the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with Applications*. 39(17): 13051-13069.

- Effect of farmers' management on movable sprinkler solid-set systems. *Agricultural Water Management*. 223: 105691.
- Merkley, G.P. and Allen, R.G. 2004. *Sprinkle & Trickle Irrigation: Lecture Notes*. Biological and Irrigation Engineering Department, Utah State University.
- Merriam, J.L. and Keller, J. 1978. *Farm irrigation system evaluation: A guide for management*.
- Montazar, A. and Behbahani, S.M. 2007. Development of an optimised irrigation system selection model using analytical hierarchy process. *Biosystems Engineering*. 98(2): 155-165.
- Pagsuyoin, S.A., Santos, J.R., Latayan, J.S. and Barajas, J.R. 2015. A multi-attribute decision-making approach to the selection of point-of-use water treatment. *Environment Systems and Decisions*. 35(4): 437-452.
- Rodrigues, G.C., Paredes, P., Gonçalves, J.M., Alves, I. and Pereira, L.S. 2013. Comparing sprinkler and drip irrigation systems for full and deficit irrigated maize using multicriteria analysis and simulation modelling: Ranking for water saving vs. farm economic returns. *Agricultural Water Management*. 126: 85-96.
- Seginer, I. and Kostrinsky, M. 1975. Wind, sprinkler patterns, and system design. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*. 101(4): 251-264.
- Shafiullah, G. and Al-Ruwaih, F. M. 2020. Spatial-multivariate statistical analyses to assess water quality for irrigation of the central part of Kuwait. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 79(1): 27-37.
- Silva, L.L. 2006. The effect of spray head sprinklers with different deflector plates on irrigation uniformity, runoff and sediment yield in a Mediterranean soil. *Agricultural Water Management*. 85(3): 243-252.
- Tian, G., Zhang, H., Feng, Y., Wang, D., Peng, Y. and Jia, H. 2018. Green decoration materials selection under interior environment characteristics: A grey-correlation based hybrid MCDM method. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 81: 682-692.
- Tu, Q., Li, H., Wang, X., Chen, C., Luo, Y. and Dwomoh, F. A. 2014. Multi-criteria evaluation of small-scale sprinkler irrigation systems using Grey relational analysis. *Water Resources Management*. 28(13): 4665-4684.
- Walker, W.R. and Skogerboe, G.V. 1987. Surface Faryabi, A., Maroufpoor, E., Ghamarnia, H. and Yamin Moshrefi, G. 2020. Comparison of classical sprinkler and wheel move irrigation systems in Dehgolan plain, North-West Iran. *Irrigation and Drainage*. DOI: 10.1002/ird.2412.
- Gu, H. and Xu, J. 2011. May. Grey relational model based on AHP weight for evaluating groundwater resources carrying capacity of irrigation district. In 2011 International Symposium on Water Resource and Environmental Protection (Vol. 1, pp. 308-310). IEEE.
- Hosseinzade, Z., Pagsuyoin, S.A., Ponnambalam, K. and Monem, M.J. 2017. Decision-making in irrigation networks: Selecting appropriate canal structures using multi-attribute decision analysis. *Science of the Total Environment*. 601: 177-185.
- Ju-Long, D. 1982. Control problems of grey systems. *Systems & Control Letters*. 1(5): 288-294.
- Keller, J. 1983. *SCS national engineering handbook Section 15*. US Government Office, Washington DC.
- Keller, J. and Bliesner, R.D. 1990. *Sprinkler and trickle irrigation*, Van Nostrand Reinhold, New York.
- Li, P., Wu, J. and Qian, H. 2012. Groundwater quality assessment based on rough sets attribute reduction and TOPSIS method in a semi-arid area, China. *Environmental Monitoring and Assessment*. 184(8): 4841-4854.
- Liu, D., Qi, X., Li, M., Zhu, W., Zhang, L., Faiz, M. A., and Cui, S. 2019. A resilience evaluation method for a combined regional agricultural water and soil resource system based on Weighted Mahalanobis distance and a Gray-TOPSIS model. *Journal of Cleaner Production*. 229: 667-679.
- Liu, H.C., Li, P., You, J.X. and Chen, Y.Z. 2015. A novel approach for FMEA: Combination of interval 2-tuple linguistic variables and gray relational analysis. *Quality and Reliability Engineering International*. 31(5): 761-772.
- Liu, H.J. and Kang, Y. 2006. Effect of sprinkler irrigation on microclimate in the winter wheat field in the North China Plain. *Agricultural Water Management*. 84(1-2): 3-19.
- Maroufpoor, E., Faryabi, A., Ghamarnia, H. and Moshrefi, G.Y. 2010. Evaluation of uniformity coefficients for sprinkler irrigation systems under different field conditions in Kurdistan Province (northwest of Iran). *Soil and Water Research*. 5(4): 139-145.
- Maroufpoor, S., Maroufpoor, E. and Khaledi, M. 2019.

Science of the Total Environment. 719: 137502.

Zhang, F.B., Wang, Z.L. and Yang, M.Y. 2015. Assessing the applicability of the Taguchi design method to an interrill erosion study. Journal of Hydrology. 521: 65-73.

irrigation. Theory and practice. Prentice-Hall.

Yang, T., Zhang, Q., Wan, X., Li, X., Wang, Y. and Wang, W. 2020. Comprehensive ecological risk assessment for semi-arid basin based on conceptual model of risk response and improved TOPSIS model-a case study of Wei River Basin, China.

Ranking of Sprinkler Irrigation Systems Using Hybridizing of Multi-Attribute Decision-Making Approaches of Entropy, Grey Relational, and TOPSIS (EGC-TOPSIS): Dehgolan Plain

A. Seifi^{1*}

Received: Jul.05, 2020

Accepted: Aug.25, 2020

Abstract

Today, appropriate selection of irrigation systems in farms is necessary for increasing water use efficiency. The selection of irrigation systems in different regions is complex problem and involves different factors and levels of decision making. In the present study, by hybridizing multi-attribute decision-making (MADM) approaches of Entropy, grey relational, and TOPSIS; an integrated method of EGC-TOPSIS were applied for appropriate selection of sprinkler irrigation systems based on performance evaluation indicators of irrigation systems. Then, the results of hybrid EGC-TOPSIS method were compared with E-TOPSIS method. Also, the hybrid principal component analysis-multiple linear regression (MLR-PCA) model was used for identify the estimation equations of ultimate decision index and distance closeness index for hybrid EGC-TOPSIS and E-TOPSIS methods, respectively. For this aim, 20 sprinkler irrigation systems including movable sprinkler solid-set and wheel-move irrigation systems were evaluated in Dehgolan plain as case study. The evaluation was done by single sprinkler approach and using indicators of Christensen uniformity coefficient, distribution uniformity, water application efficiency in the lower quarter, potential efficiency of lower quarter, deep percolation losses, and wind drift and evaporation losses. The entropy results show that the distribution uniformity with weight of 0.194 is the most effective factor for ranking of studied irrigation systems. The mean ultimate decision index and mean ranks of wheel-move irrigation systems were calculated equal to 0.52 and 9.1, respectively that show the superiority of this system than movable sprinkler solid-set system in the studied region. This result was approved by cluster analysis method. The ranking results of both hybrid EGC-TOPSIS and E-TOPSIS models were significantly correlated with $R^2=0.79$. Also, the MLR-PCA model with three main components was appropriately able to estimate ultimate decision index by $R^2=0.95$. Based on the results, the hybrid EGC-TOPSIS method with strong mathematical background can produce useful, comprehensive, and practical results that can be utilized for evaluating and ranking of irrigation systems in similar regions.

Keywords: Potentiality, Principal component analysis, Feasibility analysis, Novel irrigation system, Performance indicators.

1- Department of Water Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Iran
Email: a.seifi@vru.ac.ir