



بررسی اثر تغییر اقلیم گذشته بر روند ردپای آب زعفران در مناطق همگن اگروکلیماتیک خراسان

زهرا گرکانی نژاد مشیزی^۱، ام‌البنین بذرافشان^{۲*}، هادی رضوانی اعتدالی^۳، یحیی اسماعیل‌پور^۴، برایان کالینز^۵
۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، هرمزگان، ایران.

۲- دانشیار گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، هرمزگان، ایران.

۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

۴- استادیار گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، هرمزگان، ایران.

۵- پژوهشگر، دانشکده علوم و مهندسی، دانشگاه جیمز کوک، تانسویل، استرالیا.

*نویسنده مسئول: [Email: bazrafshan1361@gmail.com](mailto:bazrafshan1361@gmail.com)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۰۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۹

چکیده

زعفران از کارآمدترین محصولات کشاورزی از نظر مصرف آب بوده و از نظر نیاز به عناصر غذایی نیز گیاهی کم‌توقع محسوب می‌شود. ایران بزرگ‌ترین تولیدکننده و صادرکننده زعفران در جهان است به طوری که حدود ۹۰٪ از تولید و سطح زیرکشت زعفران در دنیا متعلق به ایران است. ۹۶٪ زعفران ایران در خراسان تولید می‌شود. تحقیق حاضر با هدف بررسی تغییرات ردپای آب زعفران تحت تاثیر تغییر اقلیم گذشته طی دوره‌ی ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۶ در خراسان صورت گرفته است. براساس نتایج مناطق تولید زعفران در خراسان با کمک روش FCM به سه منطقه همگن اگروکلیماتیک تقسیم شد. میانگین وزنی ردپای آب کل زعفران در خراسان ۲۸۳۳ مترمکعب بر کیلوگرم است که سهم ردپای آبی و سبز به ترتیب ۸۹/۸۱، ۱۱/۱۸ سهم ردپای آب خاکستری بسیار ناچیز و در حدود ۰/۰۰۵ درصد است؛ که بیشترین ردپای آب مربوط به شهرستان بجستان (کلاستر ۲) (۴۱۷۶/۸ مترمکعب بر کیلوگرم) و کمترین ردپای آب مربوط به شهرستان بشرویه (کلاستر ۳) (۱۶۰۹/۵ مترمکعب بر کیلوگرم) می‌باشد. متوسط ارزش اقتصادی زعفران ۰/۶۱ دلار بر مترمکعب است که به ترتیب بیشترین و کمترین آن متعلق به شهرستان بشرویه و بجستان (۱/۰۳ و ۰/۴۰ دلار در هر مترمکعب) می‌باشد. نتایج تحلیل روند عملکرد و ردپای آب زعفران نشان داد که اجزاء ردپای آب زعفران طی دوره آماری مورد مطالعه دارای روند کاهشی معنی‌دار و عملکرد زعفران نیز طی این دوره دارای روند افزایشی می‌باشد. همچنین روند متغیرهای اقلیمی نشان داد، دما رو به افزایش و رطوبت و بارش رو به کاهش است، اما این روند از نظر آماری بی‌معنی و ناچیز است.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، ردپای آب، زعفران، آزمون رگرسیون چند متغیره، آزمون من-کندال.

مصرف جامعه تحت فشار شدیدی قرار دارند (Mekonnen & Hoekstra, 2016; Reddy et al., 2022). همچنین با افزایش جمعیت و توسعه اقتصادی-اجتماعی، بحران آب به یک مشکل بزرگ در سراسر جهان تبدیل شده است. برای پاسخگویی به چالش‌های کمبود آب شیرین، نیاز به کاهش چشم‌گیر مصرف آب در بخش کشاورزی وجود دارد (Safdari et al., 2022) زیرا آب یک منبع طبیعی محدود کننده برای تولید محصولات کشاورزی است. بهبود کارایی مصرف آب در این بخش می‌تواند مستقیماً به افزایش تامین آب برای سایر مصارف کشاورزی و غیر کشاورزی کمک کند و باعث تولید پایدار محصولات کشاورزی در سراسر جهان شود (Wang, 2010).

بخش کشاورزی نقش اساسی و حیاتی در اقتصاد ملی و تولید مواد غذایی در ایران دارد، به طوری که حدود ۲۷ درصد تولید ناخالص ملی و ۲۲ درصد نیروی کار کشور مرتبط با این بخش است. در این میان به واسطه پراکنش نامناسب زمانی و مکانی بارندگی و عدم مدیریت عرضه و تقاضای منابع آب در کشور به ویژه در مناطق بسیار کم‌آب و خشک، مدیریت منابع آب را به خصوص در بخش کشاورزی با مشکلات جدی روبه‌رو ساخته است. علاوه بر آن در مناطق خشک کشور مانند قسمت‌های جنوب تقریباً ۱۰۰ درصد تولیدات کشاورزی از کشت آبی حاصل می‌شود (Babazadeh & Saraeetabrizi, 2013). یکی از روش‌های مقابله با کم‌آبی و تأمین و ذخیره آب به ویژه در کشورهای مناطق خشک و نیمه‌خشک که امروزه مورد بحث و بررسی قرار گرفته است، آب مجازی و ردپای آب است (Bazrafshan et al., 2019a). ردپای آب شاخصی چندبعدی برای استفاده از آب شیرین است که تنها به مصرف مستقیم آب توسط مصرف‌کننده یا تولیدکننده محصور نمی‌شود بلکه در این شاخص استفاده غیرمستقیم از آب نیز در نظر گرفته می‌شود. در واقع می‌توان به این موضوع اشاره کرد که ردپای آب قادر است ارتباط بین مصارف انسانی از آب شیرین و میزان استفاده از آب در ساخت نوع خاصی از کالا را مورد تجزیه و تحلیل قرار دهد (Hoekstra et al., 2011; Ayala et al., 2016). ردپای آب به سه بخش آبی، آب سبز و آب خاکستری تفکیک می‌شود. ردپای آب سبز به حجم آب حاصل از بارش و ردپای آب آبی به حجم آب آبیاری

تغییر اقلیم و افزایش گرمایش جهانی باعث گسترش خشکسالی‌ها و تداوم آن‌ها شده و همچنین این تغییر باعث غیریکنواختی توزیع بارش می‌شود و بر منابع آب تاثیر می‌گذارد (Ahmadi et al., 2021). درجه حرارت و آب تحت تاثیر تغییر اقلیم نوسان پیدا می‌کند و در ادامه تولید محصولات کشاورزی تحت تاثیر این دو فاکتور قرار می‌گیرد (Babae et al., 2021; Maleki et al., 2019). بنابراین ضرورت دارد وقوع تغییرات اقلیمی و میزان تاثیرگذاری آن بر منابع آب ارزیابی شود؛ زیرا این پدیده در مناطقی که آسیب‌پذیری بخش آب آن‌ها در وضع موجود قابل توجه است، می‌تواند خسارات چشمگیری ایجاد کند (Asadi Zarch, 2017). در عصر حاضر مسئله آب به یکی از بحران‌های اساسی جهان تبدیل شده و بیش از پیش نقش کلیدی خود را در ایجاد زندگی بهتر برای جهانیان به اثبات رسانده است. رشد بسیار سریع جمعیت، توسعه اقتصادی-اجتماعی جوامع، برداشت جهانی از آب شیرین و گسترش سطح آلودگی‌ها از عوامل اصلی هستند که سبب شده است تا با کمبود و بحران آب بیش از پیش روبرو باشیم (Wang, 2010; Mekonnen and Hoekstra, 2011). کشاورزی از مصرف‌کننده‌های اصلی آب به‌شمار می‌رود به نحوی که ۸۵ درصد از مصارف منابع آب سطحی و زیرزمینی را به خود اختصاص داده است (Bazrafshan & Gerhani, 2018). کاهش آب مصرفی در این بخش مهم اقتصاد، از استراتژی‌های مهمی محسوب می‌شود که برای کاهش معضل کمبود آب مدنظر کارشناسان قرار دارد (Chukalla et al., 2015). در حقیقت برداشت آب و مصرف آن توسط جوامع تنها در مصارف خانگی خلاصه نمی‌شود بلکه بیشتر آبی که ما مصرف می‌کنیم آبی است که از طریق مواد غذایی مصرف می‌شود. این غذای مصرفی برای تولید از چندین زنجیره عبور کرده و سپس توزیع شده است (Chapagain et al., 2006).

انسان‌ها با تبدیل پوشش گیاهی طبیعی به زمین‌های زراعی و استخراج آب از آب‌های سطحی یا زیرزمینی برای حمایت از تولید محصول، زیست‌کره و چرخه آب جهانی را به طور قابل توجهی تغییر داده‌اند (Sidhu et al., 2021; Ellis & Ramankutty, 2008). منابع طبیعی به دلیل افزایش جمعیت جهانی و تغییرات پویا در الگوی

محصول کشاورزی در کالیفرنیا، بادام دارای بالاترین ارزش اقتصادی در بین برخی آجیل‌ها و توت‌هاست. بذرافشان و همکاران (Bazrafshan et al., 2019a)، به بررسی ردپای آب زعفران طی دوره‌ی آماری ۲۰۱۴ - ۲۰۰۸ در ایران پرداختند. نتایج نشان داد میزان کل ردپای آب زعفران ۱۵۴۱ میلیون مترمکعب در سال بود که سهم آب مجازی صادرشده ۱۳۵۴/۶ میلیون مترمکعب در سال بود. همچنین با توجه به نتایج استان‌های لرستان، آذربایجان شرقی و اصفهان دارای کم‌ترین و چهارم‌حال و بختیاری، سمنان و فارس بیش‌ترین ردپای اقتصادی را دارند.

بذرافشان و همکاران (Bazrafshan et al., 2019b)، به برآورد اجزای ردپای آب مرکبات در استان هرمزگان پرداختند و سپس تاثیر عوامل اقلیمی و غیر اقلیمی بر اجزای ردپای آب مرکبات در دوره‌ی آماری ۲۰۱۶-۲۰۰۲ را مورد بررسی قرار دادند. با توجه به نتایج که ردپای کل آب مرکبات ۶/۶۹ مترمکعب بر کیلوگرم بود که سهم ردپای آب سبز، آبی و خاکستری + سفید به ترتیب ۲، ۱۶ و ۸۲ درصد بود. همچنین نتایج نشان داد که عملکرد محصول مهم‌ترین عامل تغییرات زمانی ردپای آب مرکبات است.

رحیمی‌پور انارکی و همکاران (Rahimipour Anaraki et al., 2020) به ارزیابی آب مجازی و ردپای آب محصولات کشاورزی در شهرستان قلعه‌گنج طی سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۵ در جهت بهره‌برداری بهینه از منابع آبی موجود در این شهرستان پرداختند. بنا بر بررسی‌های انجام‌شده، بیش‌ترین سطح زیر کشت در شهرستان قلعه‌گنج در این بازه‌ی زمانی، مربوط به غلات و نخیلات است که در مجموع، بیش از نیمی از سطح ۴۸۰۰۰ هکتاری زمین‌های زیر کشت و بیش از ۶۰ درصد مجموع ردپای آب را شامل می‌شود، اما عملکرد آن‌ها پایین است. در مقابل، محصولاتی نظیر ذرت علوفه‌ای، پیاز و خربزه در مجموع ۳۸/۵ درصد از عملکرد محصولات کشاورزی شهرستان را به خود اختصاص می‌دهند و بیش‌ترین مقدار بهره‌وری آب را در بردارند.

زعفران یکی از کارآمدترین محصولات کشاورزی از نظر مصرف آب بوده و نظر نیاز به عناصر غذایی نیز گیاهی کم‌توقع محسوب می‌شود. تولید زعفران در ایران قدمتی طولانی دارد و از دیرباز کشت آن در فلات مرکزی ایران

(شامل آب‌های سطحی و زیرزمینی) اشاره دارد. ردپای آب خاکستری حجمی از آب شیرین است که برای رقیق‌سازی کودهای شیمیایی که در تولید محصول استفاده می‌شوند به‌کار برده می‌شود.

شاخص ردپای آب در سال‌های اخیر به‌طور گسترده توسط متخصصین و محققین بسیاری مورد بررسی قرار گرفته است (Hoekstra & Chapagain 2007; Hoekstra & Chapagain 2012; Chico et al., 2013; Aligholinia et al., 2015; Rasooli majd et al., 2015; Bazrafshan et al., 2019a; Bazrafshan et al., 2019b; Aligholinia et al., 2019)

برآورد تعادل آب مجازی محصولات استراتژیک در تونس نشان داد زیتون روغنی به‌عنوان یک محصول کشاورزی خواستار بیش‌ترین آب (۷ مترمکعب بر کیلوگرم) است. با توجه به محصولات اولیه میانگین نیاز آبی غلات کلاس اول ۱/۵ مترمکعب بر کیلوگرم است. علاوه بر این مصرف خرما ۳/۱ مترمکعب آب به ازای هر کیلوگرم است، مقدار آب مجازی برای درختان میوه، سیب و زیتون و بادام از ۱/۶ مترمکعب بر کیلوگرم تجاوز نمی‌کند (Talel et al., 2015).

بذرافشان و گرکانی نژاد مشیزی (Bazrafshan & Gerkan Nezhad Moshizi, 2018) تغییرات زمانی و مکانی آب مجازی در محصول گوجه‌فرنگی در استان هرمزگان را تحت تاثیر تغییر اقلیم مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد، متوسط وزنی ردپای آب در تولید گوجه‌فرنگی ۰/۹۳۶ مترمکعب در کیلوگرم بوده که بیش‌ترین و کم‌ترین میزان ردپای آب مربوط به شهرستان جاسک و بستک با مقدار ۱/۵۴ و ۰/۶۶ مترمکعب بر کیلوگرم است. متوسط حجم ردپای صادرات آب مجازی گوجه‌فرنگی ۱۰/۸ میلیون متر مکعب با ارزش ۲۸ میلیون ریال می‌باشد که بیش‌ترین و کم‌ترین سهم را به ترتیب شهرستان بندرعباس و بشاگرد داشته‌اند، اما به ترتیب بالاترین و پائین‌ترین ارزش آب مجازی مربوط به شهرستان بستک و جاسک است.

فولتون و همکاران (Fulton et al., 2019) به تحلیل زمانی ردپای آب و ارزش اقتصادی آب بادام در ۱۲ منطقه در کالیفرنیا پرداختند. نتایج نشان داد، متوسط ردپای آب بادام ۱۰/۲۴ مترمکعب بر کیلوگرم و ارزش اقتصادی ۰/۴۲ دلار بر مترمکعب است. همچنین در مقایسه با ۴۳

و جنوبی می‌باشد، حدود یک پنجم سطح ایران را شامل می‌شود. این سه استان با داشتن حدود ۹۶ درصد تولید زعفران (۲۶۹/۱۲ تن) بزرگترین منطقه تولید زعفران در ایران می‌باشند (Bazrafshan et al., 2019a). در این پژوهش داده‌های مربوط به سطح زیر کشت، تولید زعفران و میزان مصرف کود در ۳۸ شهرستان از اداره جهاد کشاورزی استان‌های مذکور و داده‌های هواشناسی نیز از بانک داده‌های هواشناسی کشور تهیه گردید (IRIMO, 2021). شکل ۱، تغییرات بارش موثر، تبخیر و تعرق گیاهی، نیاز آبی و دمای متوسط در منطقه‌ی مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

روش انجام تحقیق

روش‌شناسی خوشه‌بندی فازی کلاسترینگ

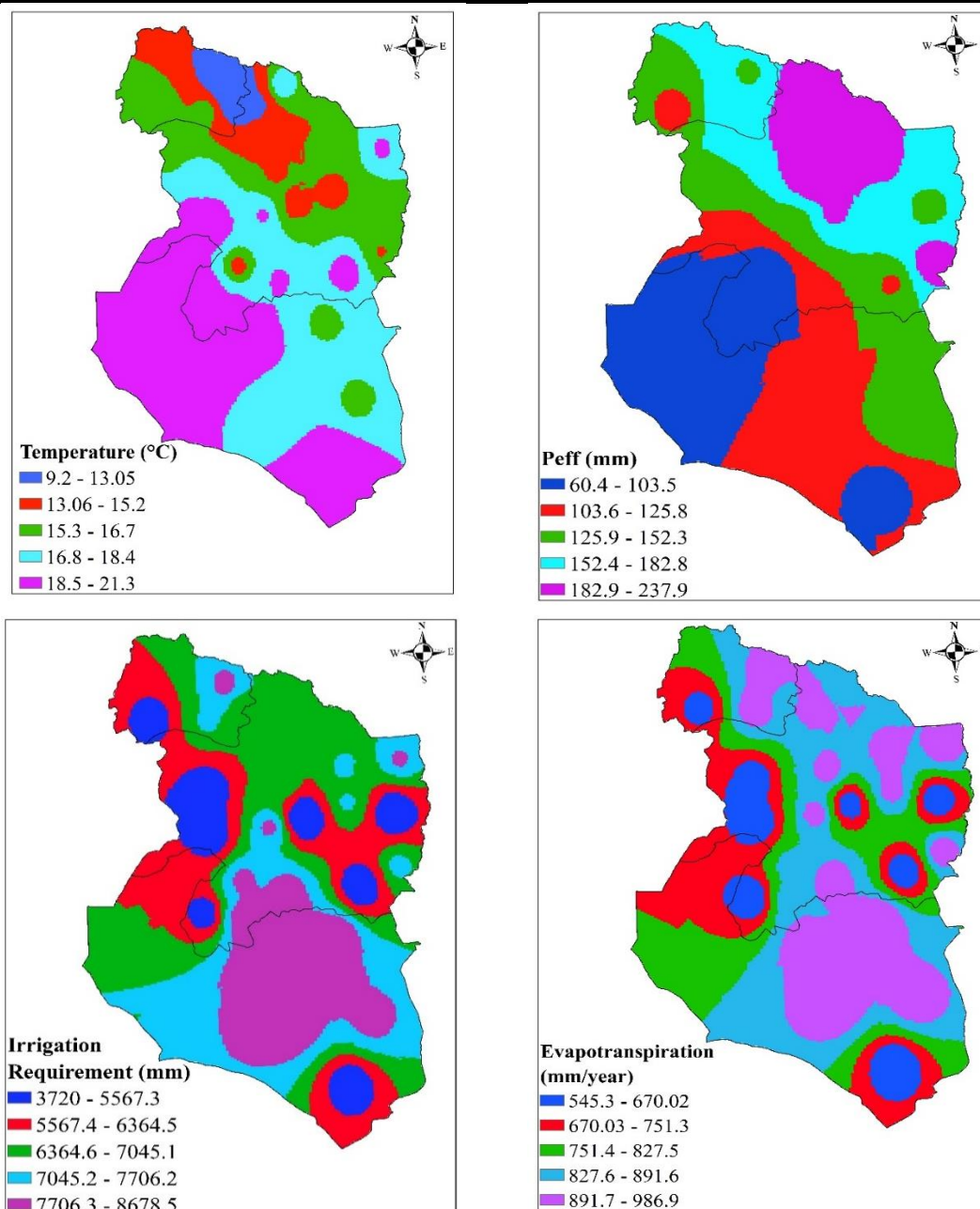
هدف از خوشه‌بندی، تقسیم داده‌ها به مجموعه‌ای از دسته‌ها است که در آن داده‌های هر دسته شباهت و نزدیکی بیشتری در مقایسه با داده‌های سایر دسته‌ها به هم دارند. الگوریتم‌های خوشه‌بندی فازی، روشی هستند که جهت تخصیص داده‌ها به مجموعه‌ای از خوشه‌ها به کار می‌روند. در این الگوریتم‌ها با استفاده از یک تابع هدف که به‌عنوان شاخص ارزیابی به کار می‌رود، داده‌های موجود به‌صورت بهینه خوشه‌بندی می‌شوند. روسپینی در سال ۱۹۶۹ اولین مدل خوشه‌بندی با ایده فازی را مطرح کرد (Ruspini, 1969). در این روش میزان عضویت یا تعلق هر شیء داده به هر خوشه، در ماتریس عضویت خوشه‌ها و n تعداد اشیاء داده است، مشخص می‌شود. در این روش دو محدودیت اصلی وضع شده است؛ اول اینکه هیچ خوشه‌ای نباید تهی باشد $(\sum_{j=1}^c u_{ij} > 0 \forall i \in \{1; \dots; c\})$ و محدودیت دوم که محدودیت نرمال سازی نامیده می‌شود، بیان می‌کند که مجموع درجه عضویت هر داده به همه خوشه‌ها باید برابر یک باشد $(\sum_{j=1}^c u_{ij} = 1 \forall i \in \{1; \dots; n\})$.

مرسوم بوده است (Khanali et al., 2017). ایران هم- اکنون بزرگ‌ترین تولید کننده و صادرکننده زعفران در جهان است به طوری که حدود ۹۰٪ از تولید و سطح زیرکشت زعفران در دنیا متعلق به ایران است و درآمد حاصل از صادرات آن، ۴۰٪ از صادرات غیرنفتی ایران را شامل می‌شود (Baghalian et al. 2010). جستجو در آمار صادرات و واردات کشورهای مختلف نشان می‌دهد که حداقل ۴۷ کشور دنیا صادرکننده یا واردکننده این کالا هستند (Bazrafshan et al., 2019a). خراسان، با تولید حدود ۹۱ درصد از زعفران جهان در هر سال (Bazrafshan et al., 2019a; Bazrafshan & Gerkanani Nezhad Moshizi, 2019)، بازار جهانی زعفران را تحت تأثیر قرار می‌دهد. زعفران یکی از محصولات صادراتی با ارزش اقتصادی بالا برای مزارع خراسان است که ۷ درصد از اراضی زیر کشت خراسان در سال ۲۰۱۷ را به خود اختصاص می‌دهد (MAJ, 2017). زعفران می‌تواند در یک محیط خشک که در تابستان کمبود شدید آب وجود دارد کشت کرد (Ghohari, et al., 2013; Farajnia & Moravej, 2020). این گیاه بیشتر در مناطق ایران- تورانی و غرب آسیا با بارش سالانه کم، زمستان‌های سرد و تابستان‌های گرم رشد می‌کند؛ امروزه زعفران در ایران و چند کشور با تمدن قدیمی کشت می‌شود (Sepaskhah and Kamgar-Haghighi, 2009). در این پژوهش سعی بر این است که مزیت کشت زعفران با توجه به مفهوم ردپای آب در خراسان که با توجه به اقلیم به سه گروه (کلاستر) تقسیم شده است مشخص شود، همچنین اثر تغییر اقلیم گذشته بر روند ردپای آب در محصول زعفران در مناطق همگن خراسان مورد بررسی قرار می‌گیرد.

مواد و روش

منطقه مورد مطالعه

منطقه خراسان در شمال شرقی ایران با ۳۱۳۳۳۵ کیلومتر مربع که شامل سه استان خراسان شمالی، رضوی



شکل ۱. تغییرات مکانی دمای متوسط، بارش موثر، نیاز آبی و تبخیر و تعرق در منطقه‌ی خراسان
Fig 1. Spatial changes of average temperature, effective precipitation, water demand and evaporation and transpiration in Khorasan region

زعفران، در نظر گرفته شد (رابطه ۱). نیاز آبی هر گیاه مجموع میزان تبخیر سطحی و تعرق از گیاه است که پارامترهای اقلیم، زمان تولید، روش آبیاری و نوع گیاه از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر آن هستند.

در روابط زیر، WF_{Green} ردپای آب سبز، WF_{Blue} ردپای آب آبی است.

محاسبه ردپای آب

در این مطالعه، اجزا مختلف ردپای آب در تولید زعفران در خراسان با بکارگیری چارچوب اوکسترا و چاپاگین (Hoekstra & Chapagin, 2008) و با اعمال تغییراتی بر این روابط، طی دوره آماری ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۶ برآورد می‌گردد. در نرم افزار کراپوات مرجع تهیه معادله فائو- پنمن- مونتیث به عنوان روش استاندارد به منظور محاسبه نیاز آبی

^۱ . Crop Water Requirement (CWR)

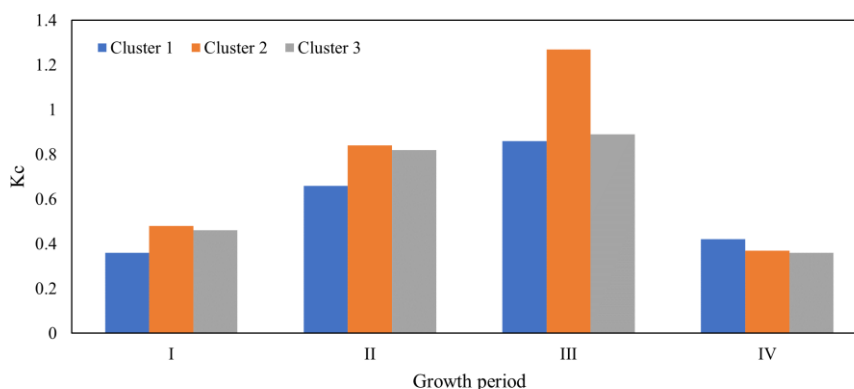
$$ET_c = K_c ET_0 \quad (3) \quad WF_{Green} = \frac{(P_e) * 10}{Y} \quad (1)$$

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (4) \quad WF_{Blue} = \frac{(ET_c - P_e) * 10}{Y} \quad (2)$$

$$WF_{Gray} = \frac{a * NAR}{C_{Max} - C_{Nat}} * \frac{1}{Y} \quad (5)$$

که در آن، a درصد تلفات کودهای نیتروژن، NAR نرخ مصرف کود برای هر گیاه به کیلوگرم در هکتار، C_{Max} غلظت بحرانی نیتروژن به کیلوگرم در متر مکعب و C_{Nat} غلظت واقعی نیتروژن در منابع آب دریافت کننده به کیلوگرم در متر مکعب است.

همچنین P_e مجموع بارندگی موثر (با استفاده از روش USDA مرجع) در طول دوره رشد زعفران (مهر تا خردادماه) به میلی‌متر نظر با استفاده از مدل کراپ وات صورت گرفت. ET_c تبخیر و تعرق هر گیاه به میلی‌متر، Y عملکرد هر محصول به تن در هکتار و عدد ۱۰ فاکتور تبدیل واحد از میلی‌متر به متر مکعب در هکتار می‌باشد. مقدار تبخیر و تعرق گیاه (ET_c) با استفاده از مدل کراپ وات براساس روش فائو-پنمن-مونتیت محاسبه گردید. تبخیر و تعرق گیاهی از رابطه ۳ و تبخیر و تعرق مرجع از رابطه ۴ محاسبه گردید. شکل ۲ مقادیر K_c را در منطقه‌ی مورد مطالعه نشان می‌دهد.



شکل ۲. ضرایب گیاهی زعفران در مناطق سه‌گانه‌ی مورد بررسی
Fig 2. The K_c of saffron in Khorasan region

بصورت متوسط وزنی با استفاده از رابطه ۷ و ۸ برآورد گردید.

$$W F V_x = \sum_i W F_{i,x} P r o d_{i,x} \quad i = 1, 2, 3, \dots, 38, \quad x = \text{blue, green, grey} \quad (7)$$

۱, ۲, ۳, ..., ۳۸, $x = \text{blue, green, grey}$

$$A W F = \frac{\sum_i W F V_{i,x}}{\sum_i P r o d_{i,x}} \quad (8)$$

در این رابطه، i شاخص شهرستان، x اجزای ردپای آب (سبز، آبی و خاکستری) و $P r o d_{i,x}$ میزان تولید زعفران

ارزش اقتصادی اجزاء ردپای آب

برای به دست آوردن ارزش ردپای آب مجازی، از مفاهیم ردپای اقتصادی استفاده گردید که با استفاده از رابطه ۶ محاسبه گردید: در این روابط $W F_E$ ارزش اقتصادی ردپای کل آب بر حسب دلار بر متر مکعب و NB سود خالص بر حسب دلار بر تن و $W F_{Total}$ ردپای آب کل بر حسب متر مکعب بر تن است.

$$W F_E = \frac{N B}{W F_{Total}}$$

پس از محاسبه اجزاء ردپای آب برای هر یک از شهرستان‌ها، مجموع هر یک از این اجزاء در سطح هر کلاستر و در سطح خراسان

مطالعه دارای روند معنی‌دار و در غیر این صورت فاقد روند ارزیابی می‌شود. این مقدار برای سطح اعتماد ۹۵ و ۹۹ درصد برابر ۱/۹۶ و ۲/۶۳ است. شکل ۳ چارچوب روش مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

شکل ۴ مناطق همگن اگروکلیماتیک تولید زعفران در منطقه مورد مطالعه، بر اساس روش FCM و با استفاده از داده‌های بارش، حداقل و حداکثر دما، رطوبت، تعداد ساعات آفتابی و سرعت باد را نشان می‌دهد؛ که کلاستر ۱ شامل شهرستان‌های جاجرم، اسفراین، فاروج، شیروان (خراسان شمالی)، قوچان، درگز، سرخس، تربت جام، فریمان (خراسان رضوی)، کلاستر ۲ شامل شهرستان‌های سبزوار، مشهد، نیشابور، تربت حیدریه (خراسان رضوی) و کلاستر ۳ شامل شهرستان‌های کاشمر، بردسکن، تایباد، خواف، گناباد، بجستان، فردوس، بشرویه (خراسان رضوی)، قائنات، سرایان، سربیشه، بیرجند، نهبندان (خراسان جنوبی) می‌باشند.

سطح زیرکشت، تولید، عملکرد زعفران به تفکیک شهرستان

مقادیر متوسط تولید، عملکرد و سطح زیرکشت زعفران به تفکیک هر شهرستان در سه استان خراسان شمالی، خراسان رضوی و خراسان جنوبی طی دوره آماری مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس مشاهدات صورت گرفته، متوسط تولید سالانه زعفران در خراسان برابر با ۱۵۷/۸ تن در سال طی دوره آماری مورد مطالعه است؛ که بیشترین و کمترین مقدار تولید زعفران در سال به ترتیب مربوط به کلاستر ۱ (۹۶/۹ تن در سال) و کلاستر ۳ (۱۲/۹ تن در سال) می‌باشد. بیشترین عملکرد زعفران مربوط به کلاستر ۳ و شهرستان فاروج (۴/۳ کیلوگرم در هکتار) و کمترین عملکرد مربوط به کلاستر ۱ و شهرستان بجستان (۲/۵ کیلوگرم در هکتار) می‌باشد. متوسط عملکرد زعفران در خراسان ۳/۲ کیلوگرم در هکتار در سال است. از نظر وسعت، تربت حیدریه (کلاستر ۲) بیشترین سطح زیر کشت (۸۲۸۷ هکتار) و مقدار تولید زعفران (۲۸ تن در سال) را به خود اختصاص داده است.

در هر شهرستان (برحسب کیلوگرم) و WFV_x رد پای آب در هر یک از اجزا (برحسب مترمکعب)؛ AWF میانگین وزنی اجزای رد پای آب در هر کلاستر برحسب مترمکعب در کیلوگرم است.

روش تحلیل روند من- کندال

به منظور تعیین روند تغییرات در هر سری زمانی از آزمون من-کندال استفاده شده است. آزمون من-کندال آزمونی ناپارامتری رتبه‌ای است و برای تعیین معنی‌داری روندهای خطی و غیرخطی مناسب می‌باشد (Nazeri Tahrudi et al., 2017). در این آزمون فرض صفر (H_0) و فرض مقابل (H_1) به ترتیب معادل بدون روند و وجود روند در سری زمانی داده‌های مشاهده‌ای است. روابط مربوطه جهت تعیین مقادیر آماره من-کندال به صورت زیر است:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i) \quad (9)$$

$$\text{sgn}(X_j - X_i) = \begin{cases} +1 & \text{اگر } (X_j - X_i) > 0 \\ 0 & \text{اگر } (X_j - X_i) = 0 \\ -1 & \text{اگر } (X_j - X_i) < 0 \end{cases} \quad (10)$$

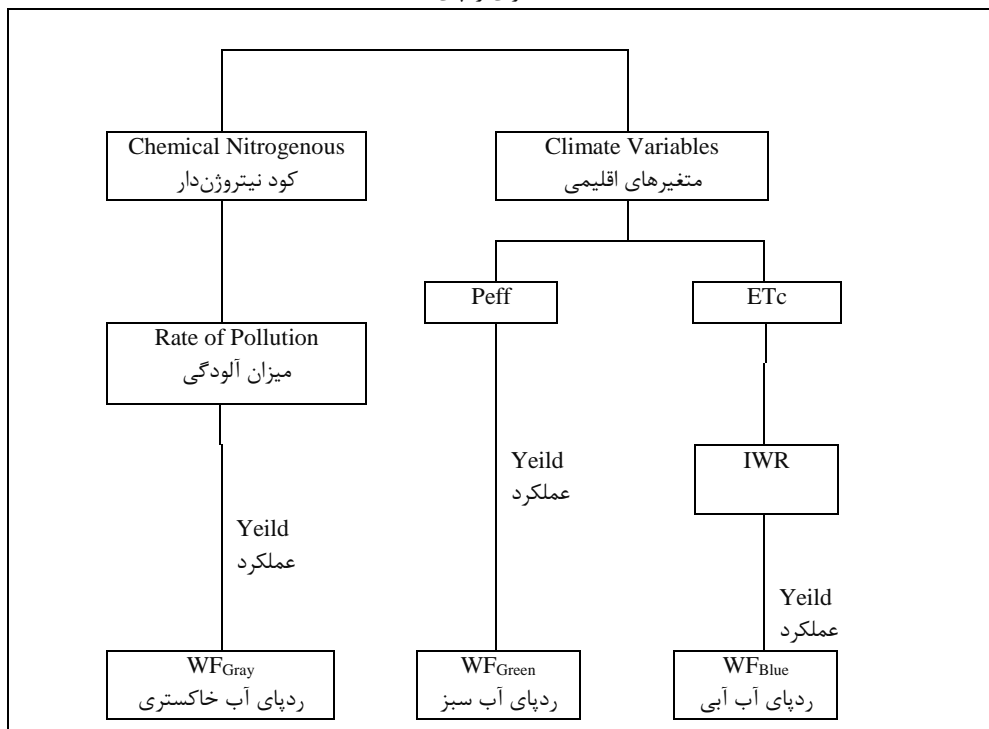
$$VAR(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p - 1)(2t_p + 5) \right] \quad (11)$$

$$Z_M = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{VAR(S)}} & \text{اگر } S > 0 \\ 0 & \text{اگر } S = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{VAR(S)}} & \text{اگر } S < 0 \end{cases} \quad (12)$$

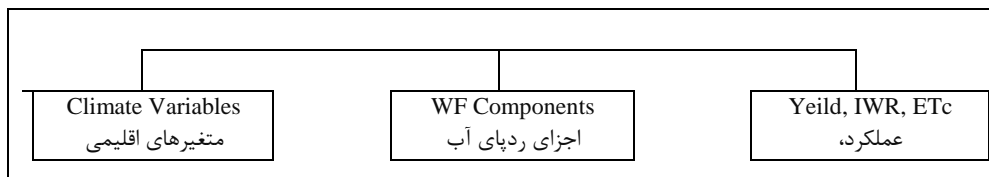
که در روابط فوق n تعداد داده مشاهده‌ای (طول دوره آماری)، X_i و X_j به ترتیب آمین و زامین داده مشاهده‌ای، و q تعداد گروه‌های ایجاد شده، t_p تعداد داده‌های برابر در P آمین گروه و Z_M مقدار آماره من-کندال می‌باشد. مقدار منفی Z_M بیانگر روند کاهشی و مقدار مثبت آن نشان‌دهنده روند افزایشی در سری داده‌ها می‌باشد. با توجه به سطح معنی‌دار ۹۰ درصد اگر $|Z_M| > 1/64$ باشد، فرض صفر رد شده و سری زمانی پارامتر مورد

WF Components Calculation

محاسبه اجزای ردپای آب

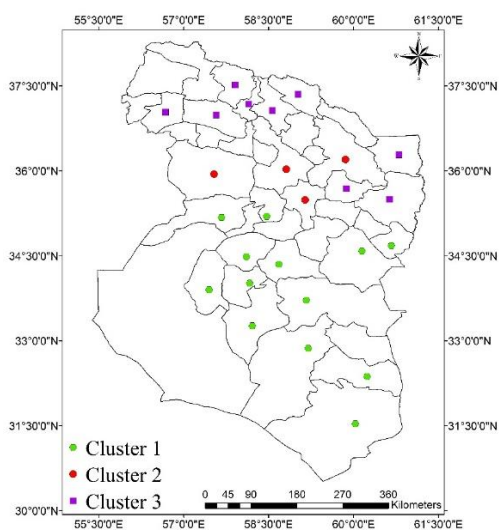


Trend analysis (M-K Test), Pearson Correlation and Regression model



شکل ۳. فلوچارت پژوهش

Fig 3. Research flowchart



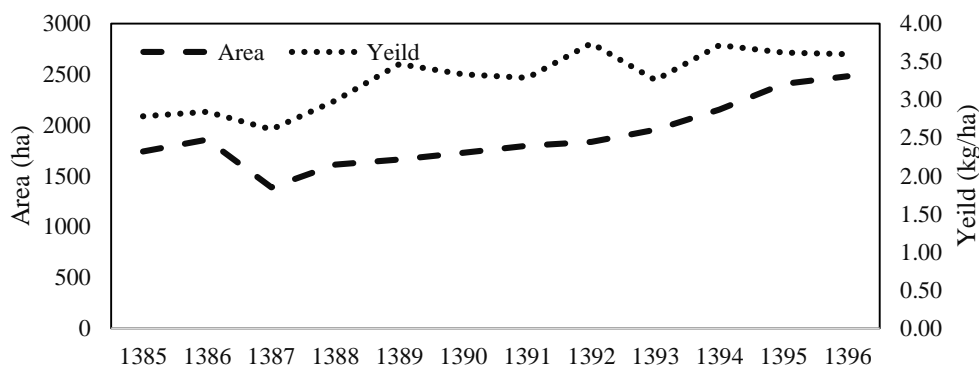
شکل ۴. مناطق همگن آگروکلیماتیک تولید زعفران در منطقه‌ی خراسان

Fig 4. Homogeneous agroclimatic regions of saffron production in Khorasan region

کپه‌ای به جای کشت دانه تسبیحی، تراکم پایین کاشت بنه، مصرف کم کود آلی، زمان نامناسب اولین آبیاری در پاییز، تاریخ کاشت نامناسب بنه‌ها، عدم کنترل به موقع علف هرز و عدم محلول پاشی عناصر غذایی در نیمه دوم زمستان به ترتیب مهم‌ترین عوامل مدیریتی تاثیرگذار در خلاء بین عملکرد سیستم کشت مرسوم و آرمانی می‌باشد (Feizi & Moradi, 2020).

شکل ۵ تغییرات عملکرد و سطح زیر کشت زعفران را طی دوره آماری مورد مطالعه در خراسان نشان می‌دهد. که با توجه به نتایج عملکرد و سطح زیر کشت زعفران طی این دوره روند افزایشی داشته‌اند.

مقایسه پائین بودن عملکرد زعفران در خراسان (۳/۲ کیلوگرم در هکتار در سال) نسبت دیگر کشورهایی که سهمی در تولید آن در دنیا دارند مانند ایتالیا (۸/۳) و اسپانیا (۷/۹۴ کیلوگرم در هکتار) (FAO, 2018) قابل توجه است. بنابه نظر فیضی و مرادی (Feizi & Moradi, 2020) براساس طرح کشت آرمانی، متوسط عملکرد زعفران در خراسان ۲۰ کیلوگرم در هکتار است. به‌طور کلی می‌توان دلایل پائین بودن عملکرد زعفران در خراسان در کشت مرسوم را به دو دسته اقلیمی و مدیریتی تقسیم‌بندی کرد که استفاده از بنه‌ی ریز به جای بنه‌ی با وزن بیش از ۸ گرم برای کاشت، کشت



شکل ۵. تغییرات سطح زیر کشت و عملکرد زعفران در منطقه مورد مطالعه طی دوره آماری ۱۳۸۵ - ۱۳۹۶

Fig 5. Changes in the cultivated area and yield of saffron in the study area during the statistical period of 2006-2017

سبز مربوط به کلاستر ۱ و شهرستان بشرویه (۱۸۸ مترمکعب بر کیلوگرم) می‌باشد. به‌طور کلی سهم ردپای آب سبز در تولید زعفران ۱۸/۱ درصد است. بدین معنی که تنها ۱۸/۱ درصد از نیاز آبی زعفران از نزولات جوی تامین می‌گردد. نتایج محققین در بررسی ردپای آب زعفران در مناطق زعفران خیز ایران نشان داد، بخش زیادی از ردپای آب در تولید زعفران در ایران ناشی از آب آبی است به‌طوری‌که این مقدار به‌طور متوسط در استان خراسان به کمتر از ۲۰ درصد می‌رسد (Bazrafshan et al., 2019a).

در بررسی میزان بارش، بارش موثر و سهم ردپای آب سبز در شهرستان‌های تربت حیدریه، تربت جام، مشهد، نیشابور و خواف، علیرغم قابل توجه بودن مقدار باران، سهم زیادی از ردپای آب مربوط به آب آبی است. با توجه به غالب بودن بارش پاییزه در این استان‌ها، با تغییر ژنوتیپ گیاهی و استفاده از واریته‌های مقاوم به کم آبی

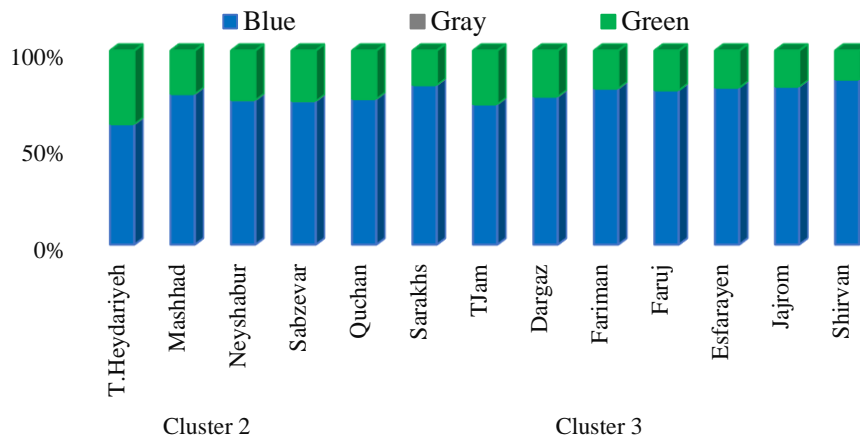
برآورد اجزاء ردپای آب زعفران در منطقه مورد مطالعه

متوسط اجزاء ردپای آب در محصول زعفران در سه منطقه به تفکیک شهرستان در جدول ۱ خلاصه شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، ردپای آب آبی در هر سه کلاستر در محدوده‌ی ۳۸۸۵ - ۱۳۳۱ مترمکعب بر کیلوگرم و میانگین وزنی آن نیز ۲۳۲۰ مترمکعب در هر کیلوگرم بوده است. بیشترین سهم ردپای آب آبی مربوط به کلاستر ۱ و شهرستان بجستان (۳۸۸۴/۸ مترمکعب بر کیلوگرم) و کمترین سهم ردپای آب آبی مربوط به کلاستر ۲ و شهرستان تربت حیدریه (۱۳۳۱/۱ مترمکعب بر کیلوگرم) می‌باشد.

میانگین ردپای آب سبز در سه کلاستر برابر با ۵۱۳ مترمکعب در کیلوگرم می‌باشد که بیشترین میزان ردپای آب سبز مربوط به کلاستر ۲ و شهرستان تربت حیدریه (۸۱۰ مترمکعب بر کیلوگرم) و کمترین مقدار ردپای آب

بیش از ۹۱ درصد دشت‌ها در خراسان در وضعیت بحرانی بوده (Rokni et al., 2014) و دشت مشهد، نیشابور و بیرجند با فرونشست جدی روبرو است (Madani, 2014). مدیریت نامناسب آبیاری، تعداد آبیاری، تاریخ و زمان نامناسب آبیاری سبب کاهش عملکرد زعفران (کاهش بهره‌وری و افزایش ردپای آب) در این مناطق شده است (Shirzadi Laskookalayeh et al., 2017) که لزوم افزایش راندمان آبیاری به کمک روش‌های نوین و بهبود مدیریت آبیاری به ویژه با انتخاب تاریخ مناسب آبیاری در این استان‌ها جهت افزایش بهره‌وری آب و عملکرد زعفران ضروری به نظر می‌رسد. تغییرات ردپای آب طی دوره‌ی آماری مورد مطالعه در هر کلاستر و در کل منطقه در شکل ۶ ارائه شده است. براساس نتایج مقدار ردپای آب محصول زعفران در استان خراسان طی دوره‌ی آماری ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۶ دارای روند کاهشی بوده است. بیشترین مقدار اجزاء ردپای آب زعفران در کلاستر ۱، کلاستر ۲ و کل منطقه مربوط به سال ۱۳۸۷ می‌باشد. این مقدار در کلاستر ۳ مربوط به سال ۱۳۸۶ می‌باشد.

امکان کشت دیم زعفران در این مناطق وجود خواهد داشت. سهم ردپای آب خاکستری در تولید زعفران که برای رقیق‌سازی کود شیمیایی استفاده می‌شود، بسیار ناچیز است. کمترین و بیشترین ردپای آب خاکستری زعفران در منطقه مورد مطالعه به ترتیب مربوط به کلاستر ۳ و شهرستان اسفراین (۰/۰۶۷ مترمکعب در کیلوگرم) و کلاستر ۱ و شهرستان نهبندان (۰/۲۱۱ مترمکعب بر کیلوگرم) می‌باشد. به‌طور کلی در خراسان سهم آب آبی و سبز به ترتیب ۸۹/۸۱، ۱۸/۱۱ درصد و سهم ردپای آب خاکستری بسیار ناچیز و در حدود ۰/۰۰۵ درصد است. شکل ۶، سهم اجزای ردپای آب را در مقیاس شهرستان‌ها در هر کلاستر نشان می‌دهد. در تمام شهرستان‌ها، سهم آب آبی، بیشترین درصد را به خود اختصاص می‌دهد. به‌طور کلی استان خراسان، دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک است که با توجه به میزان کم بارش و به موازات آن کمبود آب سبز، سهم زیادی از ردپای آب از منابع آب سطحی و زیرزمینی تامین می‌گردد. براساس گزارش آب منطقه‌ای

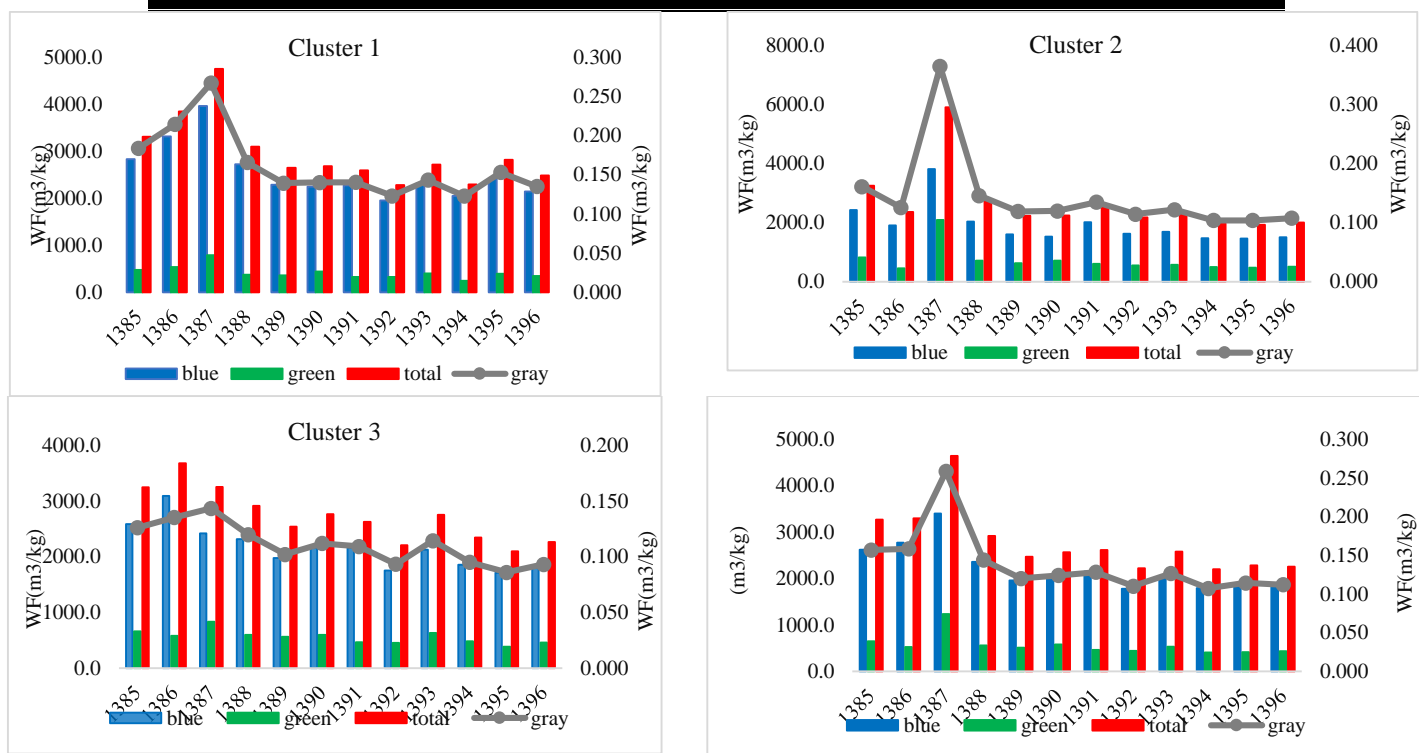


شکل ۶. نسبت سهم هر یک از اجزاء ردپای آب در تولید زعفران در شهرستان‌های اصلی تولیدکننده زعفران
 Fig 6. Shares of Saffron water footprint components in the major Saffron producing cities

جدول ۱. متوسط اجزاء ردپای آب در زعفران در سه کلاستر به تفکیک شهرستان

Table 1. Average components of water footprint in saffron in three clusters by city

ردپای کل WF _{Total} (m ³ /kg)	ردپای آب خاکستری WF _{Gray} (m ³ /kg)	ردپای آب آبی WF _{Blue} (m ³ /kg)	ردپای آب سبز WF _{Green} (m ³ /kg)	County	
4176.8	0.19	3884.8	291.9	بجستان Bajestan	
2411.4	0.17	1960.8	450.4	بردسکن Bardaskan	
3357.9	0.14	2606.3	751.5	تایباد Taybad	
2353.3	0.17	1803.9	549.3	خواف Khaf	
3178.0	0.14	2726.0	451.8	کاشمر Kashmar	
3373.2	0.14	2971.0	402.1	گناباد Gonabad	
3484.0	0.18	3052.3	431.6	بیرجند Birjand	کلاستر ۱ Cluster 1
2888.1	0.13	2599.0	288.9	فردوس Ferdows	
1609.5	0.15	1421.3	188.0	بشرویه Boshruyeh	
3126.7	0.16	2756.4	370.1	سرایان Sarayan	
3216.0	0.17	2693.7	522.1	سریشه Sarbishe	
2926.4	0.15	2556.7	369.5	قائنات Ghayenat	
2429.4	0.21	2075.4	353.8	نهبندان Nehbandan	
2411.3	0.16	1784.3	626.9	سبزوار Sabzevar	
3019.3	0.13	2344.7	674.5	مشهد Mashhad	کلاستر ۲ Cluster 2
2141.8	0.15	1331.1	810.5	ترتیب حیدریه T.Heydariyeh	
3070.5	0.13	2287.2	783.2	نیشابور Neyshabur	
2830.3	0.13	2125.4	704.7	قوچان Quchan	
2692.8	0.11	2215.1	477.6	سرخس Sarakhs	
2174.6	0.15	1573.8	600.7	ترتیب جام T.Jam	
2873.3	0.13	2192.1	681.1	درگز Dargaz	
3829.5	0.17	3081.8	747.5	فریمان Fariman	کلاستر ۳ Cluster 3
2613.4	0.08	2079.9	533.4	فاروج Faruj	
2389.5	0.07	1933.8	455.6	اسفراین Esfarayen	
1713.5	0.07	1395.3	318.1	جاجرم Jajrom	
3381.9	0.09	2876.7	505.1	شیروان Shirvan	
2833.6	0.14	2320	513.1	متوسط Average	
4176.8	0.21	3885	810.5	حداکثر Max	کل Total
1609.5	0.07	1331	188	حداقل Min	



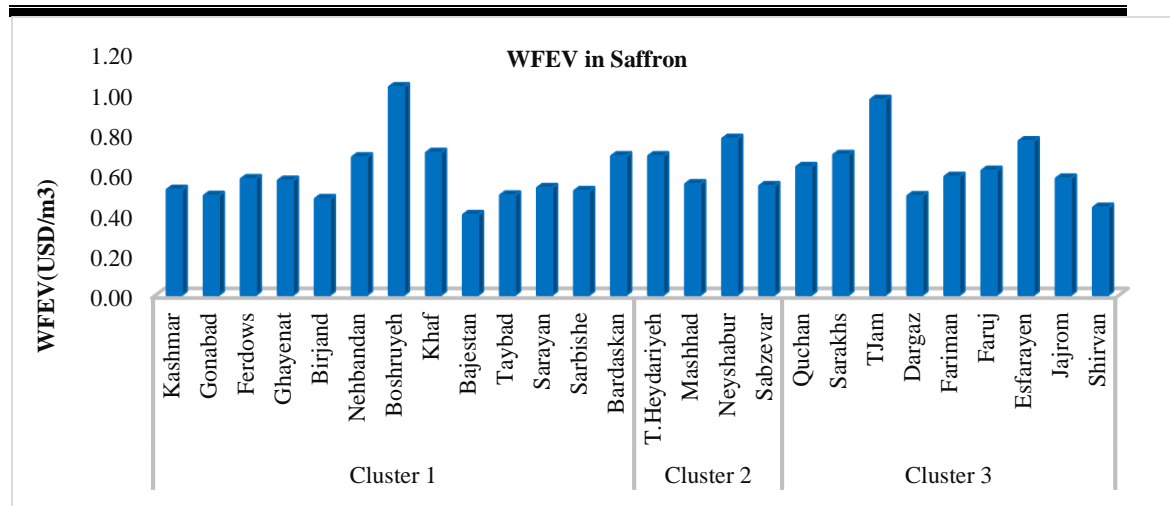
شکل ۷. تغییرات زمانی ردپای آب در محصول زعفران در کلاسترها و کل منطقه طی دوره مورد مطالعه (رنگ آبی: ردپای آب آبی، رنگ سبز: ردپای آب سبز، رنگ قرمز: ردپای آب کل، رنگ خاکستری: ردپای آب خاکستری)

Fig 7. Temporal changes of water footprint in saffron product in clusters and the whole region during the study period (blue color: blue water footprint, green color: green water footprint, red color: total water footprint, gray color: gray water footprint)

میوه‌های آلبویی، کلز و سیب درختی قرار می‌گیرد. در تحقیق ذکر شده، زعفران در بین ۳۰ محصول اصلی کشاورزی در ایران، از نظر ارزش اقتصادی دارای رتبه ۱۷ و از نظر ردپای آب در رده ۲۳ قرار دارد. قیمت بالای زعفران در بازارهای جهانی و در مقابل بالا بودن ردپای آب سبب پائین آمدن رتبه این محصول شده است. از نظر تغییرات مکانی ارزش اقتصادی در منطقه‌ی خراسان، بیشترین و کمترین ارزش اقتصادی ردپای آب آبی به ترتیب مربوط به کلاستر ۱، شهرستان بشرویه (۱/۰۳ دلار در هر مترمکعب) و بجستان (۰/۴ دلار در هر مترمکعب) می‌باشد. یکی از مهم‌ترین عوامل موثر بر ارزش اقتصادی آب عملکرد در واحد سطح و ردپای آب است. بالا بودن عملکرد و پائین بودن ردپا سبب افزایش ارزش اقتصادی محصول می‌گردد.

ارزش اقتصادی ردپای آب زعفران

شکل ۸ ارزش اقتصادی اجزاء ردپای آب زعفران را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. متوسط ارزش اقتصادی آب در تولید زعفران در خراسان ۰/۶۱ دلار در هر مترمکعب است. به این معنی که ارزش هر مترمکعب آب مصرفی در تولید زعفران ۰/۶۱ دلار خواهد بود. با توجه به اینکه پیشتر گفته شد، منطقه‌ی خراسان بیش از ۹۶ درصد تولید زعفران را در برمی‌گیرد، لذا اگر ارزش اقتصادی آب در این منطقه را معرف سطح ملی در ایران نظر بگیریم، براساس نتایج پذیر افشان و همکاران (Bazrafshan et al., 2022)، این محصول در مقایسه با سایر محصولات کشاورزی در دسته ارزش اقتصادی و ردپای آب میانه همراه با محصولاتی چون بادام، مرکبات،



شکل ۸. متوسط ارزش اقتصادی رد پای آب زعفران در منطقه مورد مطالعه در هر کلاستر به تفکیک شهرستان
 Fig 8. The average economic value of saffron water footprint in Khorasan region in each cluster by city

سه کلاستر دارای روند افزایشی در سطح اعتماد ۹۰ درصد می باشد. بارش، ساعات آفتابی و حداقل دما نیز فاقد روند معنی دار هستند. روند اجزای رد پای آب و عملکرد زعفران در منطقه مورد مطالعه در سه کلاستر در جدول ۳ نشان داده شده است. میانگین وزنی اجزای رد پای آب در هر کلاستر با استفاده از رابطه ۱۰ و ۱۱ برآورد شد. با توجه به نتایج اجزای رد پای آب در هر سه کلاستر دارای روند کاهشی معنی دار و قوی در سطح اعتماد ۹۹ درصد می باشند. عملکرد زعفران نیز در کلاستر ۲ و کلاستر ۳ دارای روند افزایشی معنی دار قوی در سطح اعتماد ۹۹ درصد و در کلاستر ۱ نیز عملکرد زعفران دارای روند افزایشی در سطح اعتماد ۹۰ درصد است. به این معنی که در دوره ی مورد بررسی روند عملکرد در استان خراسان افزایشی بوده است.

بررسی روند تغییر اقلیم گذشته بر روند رد پای آب زعفران

با هدف بررسی اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای موثر بر رد پای آب در محصول زعفران، روند متغیرهای اقلیمی و روند رد پای برآورد گردید. متغیرهای اقلیمی در سطح هر کلاستر با استفاده از روش پلیگون بندی تیسن به صورت میانگین وزنی محاسبه شد. جدول ۲ نشان دهنده ی روند فاکتورهای اقلیمی در منطقه مورد مطالعه در سه کلاستر مورد بررسی طی دوره ی آماری ۱۴ ساله می باشد. با توجه به نتایج رطوبت نسبی در هر سه کلاستر دارای روند کاهشی می باشد اما از نظر آماری فقط در کلاستر ۱ دارای روند معنی دار در سطح اعتماد ۹۰ درصد می باشد و در دو کلاستر دیگر فاقد روند معنی دار است. حداکثر دما در هر

جدول ۲. روند فاکتورهای اقلیمی با استفاده از آزمون من- کندال در دوره آماری ۱۳۹۶-۱۳۸۵

Table 2. The trend of climatic factors using the Mann-Kendall test in the statistical period of 2006-2017

ساعات آفتابی Sunshine hours	بارش (میلی متر) Precipitation (mm)	رطوبت نسبی (درصد) relative humidity (%)	حداقل دما (°C) Tmin (°C)	حداکثر دما (°C) Tmax (°C)	خصوصیات آماري	
9.1	125	35.6	10.4	24.4	Average	کلاستر ۱ Cluster 1
0.03	0.23	0.07	0.05	0.03	CV	
0.71	-0.48	-1.67*	0.89	+1.73*	Z value	
8.6	216.1	44	9	22.1	Average	کلاستر ۲ Cluster 2
0.02	0.30	0.06	0.05	0.03	CV	
0.75	0.75	-1.03	0.89	+1.78*	Z value	
8.3	185.9	52.4	8.3	21.8	Average	کلاستر ۳ Cluster 3
0.03	0.21	0.05	0.06	0.03	CV	
0.21	-1.03	-1.44	1.58	+1.71*	Z value	

*معنی داری در سطح اعتماد ۹۰ درصد، ** در سطح ۹۵ درصد و *** در سطح اعتماد ۹۹ درصد و بدون علامت: فاقد معنی داری آماری

*Significance at 90% confidence level, ** at 95% confidence level and *** at 99% confidence level, No sign: no significance

جدول ۳. روند اجزاء ردپای آب در منطقه‌ی خراسان با استفاده از آزمون من- کندال در دوره آماری ۱۳۹۶-۱۳۸۵
 Table 3. The trend of water footprint components in Khorasan region using the Mann-Kendall test in the statistical period of 2006-2017

ردپای آب (مترمکعب در کیلوگرم)						
Water Footprint (m ³ /kg)						
عملکرد (کیلوگرم در هکتار) Yeild (kg/ha)	کل Total	خاکستری Gray	سبز Green	آبی Blue	خصوصیات آماری	
3.1	2963.3	0.2	417	2546.7	Average	کلاستر ۱ Cluster 1
0.14	0.24	0.27	0.34	0.23	CV	
+1.71*	-2.13**	-1.99**	-1.99**	-2.13***	Z value	
3.2	2647	0.1	720.3	1926.6	Average	کلاستر ۲ Cluster 2
0.19	0.41	0.50	0.62	0.35	CV	
3.09***	-2.81***	-2.81**	-2.26***	-2.67**	Z value	
3.5	2702.3	0.1	547.7	2154.5	Average	کلاستر ۳ Cluster 3
0.12	0.19	0.17	0.22	0.20	CV	
2.81***	-3.22***	-2.95**	-2.40***	-3.36***	Z value	

*معنی داری در سطح اعتماد ۹۰ درصد، ** در سطح ۹۵ درصد و *** در سطح اعتماد ۹۹ درصد و بدون علامت: فاقد معنی داری آماری

*Significance at 90% confidence level, ** at 95% confidence level and *** at 99% confidence level, No sign: no significance

سبب افزایش ردپای آب می‌گردد. افزایش دمای حداکثر سبب افزایش تبخیر و تعرق و در نتیجه افزایش عملکرد و کاهش ردپای آب می‌گردد.

در کلاستر سوم، عملکرد، تبخیر و تعرق گیاهی، بارش موثر و دمای حداقل بالاترین همبستگی را با ردپای آب داشته است. در بررسی اثر باران موثر بر ردپای آب، قطعا افزایش باران موثر، سبب افزایش ردپای سبز و در نتیجه ردپای کل می‌گردد. افزایش تبخیر و تعرق با توجه به معادله درون‌بناس و کسام (Allen et al., 2005) منجر به افزایش عملکرد خواهد شد و این اثر تبخیر و تعرق بر عملکرد (رابطه مستقیم بین عملکرد و تبخیر و تعرق وجود دارد به این معنا که تبخیر و تعرق بیشتر باعث عملکرد بیشتر خواهد شد) و لذا ردپای کل کاهش خواهد یافت. دمای حداقل از دو سو بر عملکرد تاثیر می‌گذارد. یک سو اثر تنش دمایی است که هرچه دمای حداقل افزایش یابد عملکرد نیز افزایش خواهد یافت. بنابراین ردپای آب کاهش می‌یابد. از سوی دیگر دمای حداقل بر تبخیر و تعرق به شدت اثر می‌گذارد. افزایش دمای حداقل باعث افزایش تبخیر و تعرق و افزایش عملکرد خواهد شد. بنابراین با افزایش عملکرد ردپای آب کاهش خواهد یافت (Allen et al., 1998).

به‌طور کلی افزایش یا کاهش ردپای آب بطور مستقیم با عملکرد، نیاز آبی، بارش موثر و تبخیر و تعرق و بطور غیرمستقیم تحت تاثیر متغیرهای اقلیمی و مدیریت مزرعه دارد. برای بررسی اثر این متغیرها بر ردپای آب از آزمون رگرسیون چندمتغیره استفاده شد. جدول ۴ نتایج تحلیل رگرسیون را نشان می‌دهد. در تمام کلاسترها عملکرد دارای ضریب منفی و مقدار قابل توجهی است. به این معنی که بیش از هر چیزی افزایش عملکرد سبب کاهش ردپای آب می‌شود. در کلاستر یک، رطوبت هوا و نیاز آبی دو عامل موثر دیگر هستند. رطوبت هوا با ضریب معکوس با ردپای آب از عوامل موثر بر تغییرات ردپاست که افزایش آن سبب افزایش بارش موثر و کاهش ردپا می‌گردد. در خصوص متغیر بعدی که نیاز آبیاری است. لذا افزایش نیاز آبیاری سبب افزایش ردپای آب می‌شود. لذا رطوبت نسبی بالا، سبب کاهش تبخیر و تعرق و نیاز آبی و در نتیجه کاهش ردپای آب را به دنبال دارد.

در کلاستر دو نیز، علاوه بر عملکرد و رطوبت، عامل دمای حداکثر نیز رابطه‌ی معنی‌داری با ردپای آب دارد. به‌طوریکه در این رابطه، افزایش دمای حداکثر و رطوبت هوا

جدول ۴. رابطه رگرسیونی متغیرهای اقلیمی و گیاهی بر ردپای آب

Table 4. Regression relationship of climatic and plant variables on water footprint

Cluster number	Variable	Coefficeince	SE Coef	T- Value	P- Value	VIF	Model
I	RH (%)	-0.0075	0.00445	-1.65	0.127	8.29	WFT = 2.425 + 0.000438 IWR - 0.00751 RH - 0.1292 Yield R-Sq=81.88%
	Yield (kg ha ⁻¹)	-0.1292	0.0433	-2.98	0.012	10.12	
	IWR (mm)	0.000438	0.00028	1.57	0.146	2.01	
II	T _{max}	0.000304	0.00011	-2.59	0.027	1.27	WFT = 0.33496 - 0.000304 T _{max} + 0.000176 RH - 0.015028 Yeild R-sq=99.94%
	RH (%)	0.000176	0.00005	3.53	0.005	10.35	
	Yield (kg ha ⁻¹)	-0.15	0.00041	-3.657	0.000	945	
III	T _{min}	-0.00403	-0.00132	-3.05	0.012	3.00	WFT = 0.2525 - 0.000081 ET _c + 0.001030 P - 0.00403 T _{min} - 0.130 Yield R-Sq=99.6%
	P _{eff} (mm)	0.00103	0.000025	41.28	0.000	1.67	
	ET _c (mm)	-0.00008	0.000036	-2.23	0.05	6.58	
	Yield (kg ha ⁻¹)	-0.13	0.0021	-3.01	0.013	3.41	

نتیجه گیری

به کلاستر ۱ و شهرستان بجستان (۳۸۸۴/۸) مترمکعب بر کیلوگرم) که با توجه به نتایج دارای کمترین عملکرد می- باشد و کمترین سهم ردپای آب آبی مربوط به کلاستر ۲ و شهرستان تربت حیدریه (۱۳۳۱/۱) مترمکعب بر کیلوگرم) می باشد. با توجه به نتایج بیشترین و کمترین ارزش اقتصادی ردپای آب کل زعفران در منطقه مورد مطالعه مربوط به کلاستر ۱ و به ترتیب شهرستان های بشرویه (۱/۰۳ دلار در هر مترمکعب) و بجستان (۰/۴۰ دلار در هر مترمکعب) می باشد. بررسی روند اجزای ردپای آب نشان داد طی دوره آماری مورد مطالعه اجزاء ردپای آب در هر سه کلاستر دارای روند کاهشی معنی داری بودند و عملکرد زعفران نیز طی این دوره دارای روند افزایشی بوده است.

روند متغیرهای اقلیمی افزایش دما و کاهش بارش (فاقد روند معنی دار) را تأیید می کند، لذا در منطقه تغییر اقلیم رخ داده است و با توجه به تغییر متغیرهای اقلیمی و اثرپذیری ردپای آب از تغییرات اقلیم، می توان با تغییر دوره ی کشت و یا تغییر ژنوتیپ بدنبال سازگاری این گونه با تغییر اقلیم بود.

تحقیق حاضر با هدف بررسی اثر تغییر اقلیم بر عملکرد زعفران در خراسان صورت گرفته است. سه استان خراسان شمالی، رضوی و جنوبی دارای بیشترین سطح زیرکشت و تولید زعفران در ایران و جهان می باشند. بر اساس نتایج به دست آمده، متوسط تولید سالانه زعفران در سه کلاستر برابر با ۱۵۷/۸ تن در سال طی دوره آماری مورد مطالعه است؛ که بیشترین و کمترین مقدار تولید زعفران در سال به ترتیب مربوط به کلاستر ۱ (۹۶/۹ تن در سال) و کلاستر ۳ (۱۲/۹ تن در سال) می باشد. بیشترین عملکرد زعفران مربوط به کلاستر ۳ و شهرستان فاروج (۴/۳ کیلوگرم در هکتار) و کمترین عملکرد مربوط به کلاستر ۱ و شهرستان بجستان (۲/۵ کیلوگرم در هکتار) می باشد. کلاستر ۲ و شهرستان تربت حیدریه بیشترین سطح زیر کشت (۸۲۸۷ هکتار) و مقدار تولید زعفران (۲۸ تن در سال) را به خود اختصاص داده است. میانگین وزنی ردپای کل آب زعفران ۲۸۳۳ مترمکعب بر کیلوگرم است که بیشترین سهم ردپای آب آبی مربوط

- Ahmadi, M., Etedali, H. R., & Elbeltagi, A. (2021). Evaluation of the effect of climate change on maize water footprint under RCPs scenarios in Qazvin plain, Iran. *Agricultural Water Management*, 254, 106969.
- Aligholinia T, Rezaie H, Bahmanesh J, Montaseri M (2015). Sustainable management of water resources in order to maximize water extraction with a water footprint approach. Master's thesis, Faculty of Agriculture, Urmia University (In Persian)
- Aligholinia, T., Sheibani, H., Mohammadi, O., & Hesam, M. (2019). Evaluation and comparison of blue, green and gray water footprint of wheat in different climates of Iran.
- Allen, F., Qian, J., & Qian, M. (2005). Law, finance, and economic growth in China. *Journal of financial economics*, 77(1), 57-116.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). FAO Irrigation and drainage paper No. 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations 56 (97): e156.
- Asadi Zarch, M. A. (2017). Analyzing climate change effects on drought occurrence in Yazd province, Iran. *Desert Management*, 5(9), 74-90. doi: 10.22034/jdmal.2017.27980.
- Ayala, L. M., van Eupen, M., Zhang, G., Pérez-Soba, M., Martorano, L. G., Lisboa, L. S., & Beltrao, N. E. (2016). Impact of agricultural expansion on water footprint in the Amazon under climate change scenarios. *Science of the Total Environment*, 569, 1159-1173.
- Babae, M., Maroufpoor, S., Jalali, M., Zarei, M., & Elbeltagi, A. (2021). Artificial intelligence approach to estimating rice yield. *Irrigation and Drainage*, 70(4), 732-742.
- Babazadeh, H., & Saraeetabrizi, M. (2013). Calibration of SWAP Model for Simulating Crop Yield, Biological Yield and Soybean Water Use Efficiency. *Irrigation Sciences and Engineering*, 35(4), 83-96.
- Baghalian, K., Sheshtamand, M. S., & Jamshidi, A. H. (2010). Genetic variation and heritability of agro-morphological and phytochemical traits in Iranian saffron (*Crocus sativus* L.) populations. *Industrial Crops and Products*, 31(2), 401-406.
- Bazrafshan, O., & Gerkani Nezhad Moshizi, Z. (2019). Assessment of Water Use Efficiency and Water Footprint of Saffron Production in Iran. *Saffron agronomy and technology*, 7(4), 505-519. doi: 10.22048/jsat.2019.141824.1311
- Bazrafshan, O., & Moshizi, Z. G. N. (2018). The impacts of climate variability on spatiotemporal water footprint of tomato production in the Hormozgan. *Journal of Water and Soil*, 32(1).
- Bazrafshan, O., Etedali, H. R., Moshizi, Z. G. N., & Shamili, M. (2019a). Virtual water trade and water footprint accounting of Saffron production in Iran. *Agricultural water management*, 213, 368-374.
- Bazrafshan, O., Zamani, H., Etedali, H. R., & Dehghanpir, S. (2019b). Assessment of citrus water footprint components and impact of climatic and non-climatic factors on them. *Scientia Horticulturae*, 250, 344-351.
- Chapagain, A. K., & Hoekstra, A. Y. (2008). The global component of freshwater demand and supply: an assessment of virtual water flows between nations as a result of trade in agricultural and industrial products. *Water international*, 33(1), 19-32.
- Chapagain, A. K., Hoekstra, A. Y., & Savenije, H. H. (2006). Water saving through international trade of agricultural products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10(3), 455-468.
- Chico D, Aldaya M, Garrido A (2013). A water footprint assessment of a pair of jeans: the influence of agricultural policies on the sustainability of consumer products. *Journal of Cleaner Production* 57:238-248
- Chukalla, A. D., Krol, M. S., & Hoekstra, A. Y. (2015). Green and blue water footprint reduction in irrigated agriculture: effect of irrigation techniques, irrigation strategies and mulching. *Hydrology and earth system sciences*, 19(12), 4877-4891.
- Ellis, E. C., & Ramankutty, N. (2008). Putting people in the map: anthropogenic biomes of the world. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 6(8), 439-447.
- Farajnia, A., Moravej, K. (2020). Agro climatic Zoning of Saffron Culture in East Azarbayjan Province. *Journal of Saffron Research*, 7(2), 251-267. doi: 10.22077/jsr.2018.1445.1057
- Feizi, H., Moradi, R. (2020). Assessing involved Managing Factors in Gap Yield between Traditional and Ideal Saffron Cultivating Systems in Razavi and South Khorasan Provinces. *Journal of Saffron Research*, 7(2), 283-298. doi: 10.22077/jsr.2019.2242.1089
- Fulton, J., Norton, M., & Shilling, F. (2019). Water-indexed benefits and impacts of California almonds. *Ecological indicators*, 96, 711-717.
- Gohari, A. R., Saeidnia, S., & Mahmoodabadi, M. K. (2013). An overview on saffron, phytochemicals, and medicinal properties. *Pharmacognosy reviews*, 7(13), 61.
- Hoekstra AY, Chapagain AK (2007). Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern. *Journal of Water Resources Management* 21(1):35-48
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). *The water*

- footprint assessment manual: Setting the global standard*. Routledge.
- Hoekstra, A. Y., Mekonnen, M. M., Chapagain, A. K., Mathews, R. E., & Richter, B. D. (2012). Global monthly water scarcity: blue water footprints versus blue water availability. *PLoS one*, 7(2), e32688.
- IRIMO, 2017. Iran Meteorological Bulletin. Islamic Republic of Iran Meteorological Organization Press, Tehran. [In Persia].
- Khanali, M., Shahvaroughi Farahani, S., Shojaei, H., & Elhami, B. (2017). Life cycle environmental impacts of saffron production in Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(5), 4812-4821.
- Madani, K. (2014). Water management in Iran: what is causing the looming crisis?. *Journal of environmental studies and sciences*, 4(4), 315-328.
- Maleki, F., Kazemi, H., Siahmargue, A., Kamkar, B. (2019). Investigation of climatic factors of Azadshahr township (Golestan province) in order to development of saffron cropping. *Journal of Saffron Research*, 7(1), 123-143. doi: 10.22077/jsr.2018.1420.1056
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1577-1600.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2016). Four billion people facing severe water scarcity. *Science advances*, 2(2), e1500323.
- Ministry of Agriculture- Jihad (MAJ), 2021.
- Nazeri Tahrudi, M., Ahmadi, F., & Khalili, K. (2017). Evaluation the Trend and Trend Chang Point of Urmia Lake Basin Precipitation. *Water and Soil*, 31(2), 644-659. doi: 10.22067/jsw.v31i2.55338
- Rahimipour Anaraki M R, Mohammadi A, Rafieian M, Arjmandi R, Karimi S. (2020). Evaluation of Virtual Water and Water Footprint of Crop Production (Case study: Qaleganj County). *Arid Regions Geographic Studies*, 11 (41) :77-92
- Rasooli Majd N, Montaseri M, Bahmanesh J, Rezaei H (2015) Identification and evaluation of the water footprint index, broken down by water, green water and gray water, by applying climate change. Master's Thesis, Faculty of Agriculture, Urmia University (In Persian)
- Reddy, K. S., Maruthi, V., Pankaj, P. K., Kumar, M., Prabhakar, M., Reddy, A. G. K., ... & Koradia, A. K. (2022). Water Footprint Assessment of Rainfed Crops with Critical Irrigation under Different Climate Change Scenarios in SAT Regions. *Water*, 14(8), 1206.
- Rokni, K., Ahmad, A., Selamat, A., & Hazini, S. (2014). Water feature extraction and change detection using multitemporal Landsat imagery. *Remote sensing*, 6(5), 4173-4189.
- Ruspini, E. H. (1969). A new approach to clustering. *Information and control*, 15(1), 22-32.
- Safdari, M., Hekmatnia, H., & Khajedad Miri, E. (2022). Water Use Efficiency of Wheat from the Perspective of Water Footprint (Case Study: Sistan and Baluchestan Province). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 15(6), 1469-1480.
- Sepaskhah, A. R., & Kamgar, H. A. (2009). Saffron irrigation regime.
- Shirzadi Laskookalayeh, S., Sabuhi Sabuni, M., Keikha, A. A., & Davari, K. (2017). Irrigation management of saffron by using the price and quantity policies of water (case study: Naishabur basin). *Saffron agronomy and technology*, 5(2), 149-160.
- Sidhu, B. S., Sharda, R., & Singh, S. (2021). Water footprint of crop production: A review. *Indian J. Ecol*, 48(2), 358-366.
- Talel, B., Marouen, H., & Fayçal, B. H. (2015, December). Unbiased minimum variance state and fault estimation for nonlinear stochastic systems with unknown disturbances. In *2015 16th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)* (pp. 291-295). IEEE.
- Wang, X. Y. (2010). Irrigation water use efficiency of farmers and its determinants: Evidence from a survey in northwestern China. *Agricultural Sciences in China*, 9(9), 1326-1337.

COPYRIGHTS

© 2022-2023 by the authors. Published by University of Birjand – Saffron Research Group. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

