

## تحلیل راهبردهای مدیریت منابع آب به روش TOPSIS بر مبنای ردپای آب محصولات کشاورزی در حوضه دز

ماندانا چاآخوری<sup>۱</sup>، نرگس ظهراپی<sup>۲</sup>، حسین فتحیان<sup>۳\*</sup>

۱، ۲ و ۳. گروه مهندسی منابع آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۹/۱۲/۱۲؛ تاریخ تصویب ۱۴۰۰/۰۴/۲۰)

### چکیده

کمبود انرژی، آب و منابع غذایی ناشی از رشد سریع جمعیت، تغییرات آب‌وهوایی، عدم تعادل اکوسیستم‌ها و تنوع اقتصادی، بزرگ‌ترین چالش برای جهان امروز است. در این مقاله، مدیریت منابع آب، انرژی و غذا با رویکرد Nexus و با استفاده از مفهوم ردپای آب در حوضه آبریز دز واقع در استان خوزستان بررسی می‌شود. به این منظور، ردپای آب محصولات عمده زراعی و باغی کشت‌شده در این حوضه محاسبه شد. برای ارائه راهکارهای راهبردی در مدیریت منابع آب با توجه به سه مؤلفه آب، غذا و انرژی از روش تحلیلی TOPSIS استفاده شد. نتایج نشان داد بالاترین شاخص ردپای آبی محصولات به ترتیب مربوط به ماش، برنج، نیشکر و کلزا بوده که به ترتیب معادل ۴۹۴۵، ۲۶۷۱، ۱۶۶۲ و ۱۲۲۷ مترمکعب در تن است. با توجه به تحلیل و اولویت راهبردهای مؤثر بر مدیریت منابع آب، غذا و انرژی به روش TOPSIS، پنج معیار جمع‌آوری و استحصال بهینه منابع آب، غذا و انرژی، تغییر الگوی آبیاری و اجرای روش‌های کم‌آبخواه، سهمیه‌بندی منابع آب کشاورزی، توسعه مدیریت ریسک و بحران برای جلوگیری از نقصان در کمیت و کیفیت منابع آب، غذا و انرژی در راستای بهبود محصولات کشاورزی، بازچرخانی و استفاده مجدد از آب با تأکید بر جایگزینی پساب برای مصارف کشاورزی و فضای سبز با به‌کارگیری روش‌های نوین استحصال آب به عنوان راهبردهای بااهمیت و تأثیرگذار در رده اول تا پنجم قرار گرفته‌اند.

**کلیدواژگان:** ردپای آب، روش TOPSIS، مدیریت منابع آب، محصولات کشاورزی.

## مقدمه

کمبود انرژی، آب و منابع غذایی ناشی از رشد سریع جمعیت، تغییرات آب‌وهوایی، عدم تعادل اکوسیستم‌ها و تنوع اقتصادی، بزرگ‌ترین چالش برای جهان امروز است. کمبود این منابع می‌تواند بی‌ثباتی اجتماعی و سیاسی، درگیری ژئوپلیتیک و آسیب‌های زیست‌محیطی جبران‌ناپذیری را به وجود آورد. گرایش‌های جهانی مانند شهرنشینی، جمعیت‌شناسی و تغییرات آب‌وهوایی که در حال حاضر در جریان هستند، چالش‌های جدی برای توسعه پایدار و مدیریت منابع انسانی به شمار می‌روند. به طور خلاصه، پایداری درازمدت مستلزم استراتژی‌های یکپارچه است، با پذیرش اینکه بسیاری از منابع طبیعی مانند آب، زمین، سوخت‌های فسیلی و مواد معدنی به علت سوء استفاده از آنها، کاهش می‌یابد. بنابراین، افزایش نیازهای آبی و ارتباط مستقیم آن با بخش کشاورزی و انرژی، ضرورت برنامه‌ریزی مناسب بهره‌برداری منابع مختلف آب، انرژی و غذا را ایجاد می‌کند، تا تعادل و توازن بین جریان برداشت و بهره‌برداری از منابع تولید و میزان تولید محصولات کشاورزی ایجاد شود. با توجه به ارتباط نزدیک سه منبع آب، انرژی و غذا و همچنین، تأثیر متقابل آنها بر یکدیگر، مفهوم جدیدی به نام رویکرد پیوندی (NEXUS) یا رویکرد هم‌بست مطرح شده است که اشاره به ذات یکپارچه و اثرات متقابل برنامه‌ریزی آب و غذا و انرژی دارد [۱].

بخش کشاورزی به‌عنوان مهم‌ترین بخش تولیدکننده مواد غذایی کشور نه‌تنها مصرف‌کننده انرژی است، بلکه مهم‌ترین عرضه‌کننده انرژی نیز محسوب می‌شود. نظر به اینکه بخش کشاورزی از یک‌طرف با محدودیت منابع تولید روبه‌رو بوده و از سوی دیگر، تأمین‌کننده امنیت غذایی جمعیت در حال رشد است، باید تعادل و توازن بین جریان برداشت و بهره‌برداری از منابع تولید و میزان تولید محصولات کشاورزی ایجاد شود. در واقع، روند استفاده از منابع تولید باید به شکل پایدار و در راستای توسعه پایدار باشد. توسعه پایدار بر اساس تعریف در سال ۱۹۹۲ در «کنفرانس زمین» عبارت است از: رفع نیازهای نسل حاضر بدون مصالحه با نسل‌های آینده در راستای تأمین نیازهایشان [۲]. طبق برآوردهای فائو، بخش کشاورزی برای تأمین نیاز افزایش جمعیت تا سال ۲۰۵۰ باید تولیدات خود را تا ۶۰ درصد افزایش دهد [۳]. همچنین، بر

اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی [۴] مقدار مصرف انرژی تا سال ۲۰۳۵ حدود ۵۰ درصد افزایش خواهد یافت. همچنین، بر اساس پیش‌بینی‌های فائو تا سال ۲۰۵۰ حدود ۱۰ درصد مصرف آب آبیاری افزایش خواهد داشت. در نتیجه، با رشد تقاضا، رقابت بر سر منابع نیز افزایش خواهد یافت. تضمین فراهمی آب، غذا و انرژی و امنیت هر سه بخش بدون کاهش منابع طبیعی به‌عنوان چالشی بزرگ در منطقه آسیا شناخته می‌شود. به این دلیل، از سال ۲۰۱۵ به بعد سازمان ملل متحد مجموعه‌ای از اهداف را موسوم به SDGs<sup>۱</sup> با هدف دستیابی به توسعه پایدار درازمدت جوامع انسانی و تضمین فراهمی غذا، آب و انرژی به منظور پایداری برای نسل‌های آینده در دستور کار خود قرار داد [۵]. در راستای عملیاتی کردن این اهداف، محققان چارچوب‌های و رهیافت‌های میان‌رشته‌ای و تخصصی متعددی را برای دستیابی به نوعی توازن و تعادل پویا و بهینه در تولید و مصرف منابع ارائه کرده‌اند که از مهم‌ترین آنها، هم‌بست یا پیوند آب، انرژی و غذا است. بر اساس این رهیافت آب، انرژی و امنیت غذایی عناصر کلیدی قانونی برای کاهش فقر با تضمین منابع کافی برای حفظ و بهبود معیشت از راه عادلانه است؛ که به‌طور هم‌زمان، حفظ اکوسیستم برای حفظ محیط‌های طبیعی سالم و بهره‌برداری از اکوسیستم را از طریق تأمین ارائه خدمات به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم برای امرار معاش لازم و ضروری می‌داند [۶]. در این راستا، ردپای آب، شاخصی برای نشان دادن حجمی از آب است که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم برای تولید کالا مصرف می‌شود. ردپای آب آبی، به حجم آبی که در تولید محصول استفاده می‌شود، (نیاز خالص) اشاره دارد. ردپای آب سبز، به سهم آب حاصل از بارندگی (مؤثر) مرتبط است. ردپای آب خاکستری، به حجمی از آب شیرین گفته می‌شود که برای رقیق‌سازی کودها و سمومی که در فرایند تولید محصول استفاده شده‌اند، مورد نیاز است. ردپای آب سفید مفهوم جدیدی است که میزان تلفات آب آبیاری در تولید محصولات را مشخص می‌سازد [۷] و [۸]. اولویت اصلی هر سیستم مدیریت منابع، مدیریت پایدار منابع است [۹]. پایداری منابع آب را می‌توان به‌عنوان «توانایی استفاده از آب در مقادیر و کیفیت کافی از مقیاس محلی تا جهانی برای پاسخ‌گویی به نیازهای انسان‌ها و اکوسیستم‌ها در حال حاضر و آینده برای حفظ زندگی و

استناد به یک شاخص نمی‌توان در مورد اثربخشی سیاست‌ها تصمیم‌گیری قطعی کرد. همچنین، در مجموع می‌توان اظهار داشت که در نظر گرفتن هم‌زمان پیوند آب، غذا و انرژی در تحلیل عملکرد شبکه‌های آبیاری و انتخاب سیاست‌های برتر امری ضروری است [۱۶]. اسلامی و همکاران (۲۰۲۰) به مطالعه موضوع کاربرد مدل‌سازی در مدیریت رابطه پیوندی آب، غذا و انرژی پرداختند. در مقاله یادشده، دیدگاه رابطه پیوندی در مدیریت یکپارچه منابع با رویکرد بهینه‌سازی معرفی می‌شود. نتایج بررسی‌ها در مدل‌سازی نشان داد چگونه این نوع آنالیزها می‌توانند به تصمیم‌گیرندگان و ذی‌نفعان یک منطقه کمک کنند تا تصمیم‌های به‌صرفه‌ای در مدیریت بهینه منابع آب، انرژی و غذا بگیرند [۱۷]. گلابی و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی تعیین الگوی کشت بهینه مبتنی بر شاخص ردپای آب (مطالعه موردی: استان کرمانشاه) پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد در بین محصولات مطالعه‌شده در بخش زراعی هندوانه، ذرت علوفه‌ای و چغندر قند به عنوان محصولات برتر از نظر شاخص ردپای آب و در مقابل کنجد، لوبیا و آفتابگردان به عنوان نامناسب‌ترین محصولات از نظر این شاخص شناخته شدند. در بخش تولیدات باغی نیز گیلان-آلبالو به عنوان محصول برتر و بادام به عنوان محصول نامناسب از نظر شاخص ردپای آب معرفی شدند. در میان تمام دشت‌های استان، دشت کرمانشاه در بخش تولیدات زراعی و باغی بیشترین سهم ردپای آب را داشت. تقریباً برای تمامی محصولات مطالعه‌شده ردپای آب آبی بیشتر از آب سبز بوده است که نشان می‌دهد اتکای تولیدات استان به منابع آب سطحی و زیرزمینی است [۱۸].

هدف اصلی از انجام پژوهش حاضر، بررسی مدیریت بهینه منابع آب، انرژی و غذا با رویکرد نکسوس و با استفاده از مفهوم ردپای آب است که به بررسی مفهومی همبست یا پیوند منابع آب، انرژی و غذا در مدیریت بهینه منابع و بررسی مفهوم و جایگاه ردپای آب در مدیریت بهینه منابع و رابطه میان مدیریت بهینه منابع آب، انرژی و غذا با رویکرد نکسوس و با استفاده از مفهوم ردپای آب می‌پردازد.

با توجه به ضرورت بهینه‌سازی مدیریت منابع آب، غذا و انرژی با رویکرد هم‌بست و جمع‌نگر هم‌بست با مدیریت جامع منابع آب و اهمیت توجه به ذات یکپارچه و اثرات متقابل برنامه‌ریزی این منابع بر یکدیگر هر گونه تلاش برای رسیدن به توازن میان این اهداف با منافع و نیازهای مردم و محیط زیست در سطح منطقه‌ای، ملی و جهانی حائز اهمیت

همچنین، محافظت از انسان در برابر خسارت‌های ناشی از بلایای طبیعی و انسانی و حفظ زندگی پایدار» تعریف کرد. آب بسیاری از جنبه‌های وجود ما را تحت تأثیر قرار می‌دهد، جنبه‌های بسیاری وجود دارد که باید در پایداری منابع آب مورد توجه قرار گیرند. در مناطق خشک و نیمه‌خشک «با منابع آب سطحی محدود» رشد بخش‌های مختلف نیازمند مدیریت پایدار منابع آب موجود به‌خصوص منابع آب زیرزمینی است [۱۰]. با توجه به بحران‌های آبی و محیط زیستی که امنیت غذایی و انرژی کشور را با چالش مواجه کرده است؛ مدیریت پیوند آب، انرژی و غذا با مشارکت تمام ذی‌نفعان می‌تواند این تغییرات را در بخش‌های مختلف کنترل کند [۱۱].

مکونن و هواکسترا (۲۰۱۴) ضمن بیان اینکه کاهش ۲۵ درصد ردپای آب محصولات در دنیا موجب ذخیره ۳۹ درصد آب می‌شود، دو عامل استفاده از فناوری‌های خاص در کشاورزی و شیوه کشت زرع را به عنوان معیارهای اصلی در میزان ردپای آب محصولات تولیدی در هر منطقه، کاهش آن معرفی کردند [۱۲]. چوچان و همکاران (۲۰۱۵) در مطالعه‌ای ردپای آب تونس را به تفکیک سه جزء آبی، سبز و خاکستری در سطح ملی- محلی برای دوره ۱۹۹۶-۲۰۰۵ تجزیه و تحلیل کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد گوجه‌فرنگی و سیب‌زمینی به عنوان محصولات با بهره‌وری آب نسبتاً زیاد و زیتون و جو محصولاتی با بهره‌وری آب کم معرفی شدند [۱۳]. رودریگز و همکاران (۲۰۱۵) در بررسی ردپای آب تولیدات سیب‌زمینی در آرژانتین، کل ردپای آب سیب‌زمینی را ۳۲۳/۹۹ تن در مترمکعب بیان کردند که از این مقدار، سهم ردپای آب آبی و آب سبز به ترتیب ۵۶/۴ درصد و ۲۴/۱۵ است [۱۴]. سو و همکاران (۲۰۱۵) ردپای آب پنج محصول ذرت، سیب زمینی، نیشکر، ذرت خوشه‌ای شیرین و برنج منطقه نیمه‌گرمسیر تایوان را بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد کمترین ردپای آب مربوط به سیب زمینی بوده است. برای مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری نیشکر به علت استفاده بیشتر از آب باران و برای مناطق معتدل، ذرت بهتر است [۱۵].

حسینی و دلاور (۲۰۲۰) در تحقیق با موضوع کاربرد ارزیابی پیوند آب، غذا و انرژی در مدیریت شبکه‌های آبیاری مطالعه موردی شبکه آبیاری زاینده‌رود، نشان دادند هر چند هر یک از شاخص‌های بهره‌وری به‌تنهایی منعکس‌کننده اثرات هر یک از سیاست‌ها در شبکه‌های مختلف هستند، اما با

حدود ۳۱ درصد از منابع آب‌های سطحی کشور را شامل می‌شود. این استان امکاناتی از نظر استفاده از منابع آب‌های زیرزمینی نیز دارد که بیشتر به پتانسیل منابع آب‌های سطحی افزوده خواهد شد، به طور کلی آب‌های زیرزمینی خوزستان نسبت به منابع سطحی درصد محدودی است [۱۹]. طبق آمارنامه منتشرشده در سال زراعی ۱۳۹۵-۱۳۹۶، بیشترین سطح برداشت‌شده محصولات زراعی آبی کشور مربوط به استان خوزستان بوده، به طوری که ۱۳/۲ درصد از سطح اراضی کشت آبی کشور در این استان برداشت شده است که حدود ۸۸ درصد از کل اراضی آن اختصاص به کشت آبی و ۱۲ درصد اراضی مربوط به کشت دیم بوده است. در این سال، استان خوزستان از لحاظ میزان تولید و سطح محصولاتی همچون گروه غلات، محصولات صنعتی، و سبزیجات در رتبه اول کشور بوده است، به طوری که حدود ۳۳ درصد (تقریباً یک سوم) از کل میزان تولیدات محصولات زراعی، مربوط به استان خوزستان است که سهم تولید محصولات آبی ۱۹/۸ درصد بیشترین تولید در زراعت آبی را به خود اختصاص داده است [۲۰]. جدول ۱ ترکیب کشت و درصد تولید محصولات کشاورزی آبی در استان خوزستان را نشان می‌دهد.

است. بنابراین، در این مطالعه حوضه آبریز دز به عنوان قطب بزرگ کشاورزی استان خوزستان، که با توجه به پیاده‌سازی طرح عظیم دز و ساخت انواع سد و شبکه توسط متخصصان و مهندسين مشاور در این حوضه آبریز، کارکرد زیادی در آبادانی این استان داشته و به دلیل سهم زیاد آن در میزان تولیدات محصولات کشاورزی و رونق اقتصادی منطقه، به عنوان محدوده مطالعاتی تحقیق مورد نظر انتخاب شده است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مطالعه شده

استان خوزستان با داشتن یک سوم منابع آب‌های سطحی کشور و وجود رودخانه‌های بزرگ و زمین‌های مستعد کشاورزی از گذشته به عنوان قطب بزرگ کشاورزی در کشور مطرح بوده است، به طوری که وجود این پتانسیل‌ها، منجر به اجرای پروژه‌های بزرگ عمرانی در خوزستان به عنوان سرلوحه اولین برنامه هفت‌ساله توسعه اقتصادی-اجتماعی ایران طی سال‌های ۱۳۳۴-۱۳۴۱ شد. پنج رودخانه بزرگ کرخه، دز، کارون، مارون-جراحی و زهره-هندیجان، تأمین‌کننده عمده منابع آب استان خوزستان هستند. حجم آبدهی این رودخانه‌ها بیش از ۳۲ میلیارد مترمکعب است که

جدول ۱. ترکیب کشت و درصد تولید محصولات کشاورزی آبی در استان خوزستان

طبقه‌بندی محصولات	ترکیب کشت (درصد)	درصد تولید
غلات	۶۵/۵	۱۶/۲
حبوبات	۳/۴	۰/۳
دانه‌های روغنی و صنعتی	۱۵/۶	۵۶/۸
سبزیجات	۷/۱	۱۰/۵
محصولات جالیزی	۳/۷	۵/۳
نباتات علوفه‌ای	۴/۸	۱۰/۹

### محاسبه نیاز آبی محصولات کشاورزی

برای محاسبه نیاز آبی محصولات کشاورزی در دشت دزفول از نرم‌افزار CROPWAT و محاسبات به‌هنگام‌سازی نیاز آبی گیاهان زراعی و باغی کشور مطالعه موردی استان خوزستان استفاده شد. این نرم‌افزار در واقع خروجی و نتیجه طرح «نیاز خالص آبیاری محصولات زراعی و باغی ایران» است که توسط وزارت جهاد کشاورزی و سازمان هواشناسی انجام گرفته است که در آن به برآورد نیاز آبی گیاهان با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی معرف ۶۲۰ دشت ایران و با استفاده از روش پنمن-مونتیت به محاسبه تبخیر-تعرق پرداخته است و از آنجا که به عنوان معیار اصلی برای برآورد نیاز آبی

در این میان، حوضه آبریز دز نیز سهم زیادی در میزان کشت و تولیدات استان دارد. محصولات کشت‌شده در این حوضه، از تنوع زیادی برخوردار است و محصولاتی نظیر گندم، ذرت، شلتوک، نیسکر، چغندرقد، حبوبات، دانه‌های روغنی، نباتات علوفه‌ای و انواع سبزی و صیفی و باغ‌ها در این حوضه کشت می‌شود. در این میان، سه محصول گندم، نیسکر و ذرت، بیشترین سطح زیر کشت را دارند، به طوری که مجموع سطوح کشت این سه محصول بیش از ۷۰ درصد ترکیب کشت منطقه را شامل می‌شود. در جدول ۲ سطح زیر کشت محصولات کشاورزی در حوضه آبریز دز طی سال‌های ۱۳۹۱-۱۳۹۲ تا ۱۳۹۷-۱۳۹۸ آورده شده است.

متوسط دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (CO)، U2: متوسط سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (m/s)،  $(e_s - e_a)$ : کمبود فشار بخار در ارتفاع ۲ متری (kpa)،  $\Delta$ : شیب منحنی فشار بخار ( $kpa/c^0$ )،  $\gamma$ : ضریب سایکرومتری ( $kpa/c^0$ ) و G: شار گرما به داخل خاک ( $MJ/m^2$  day) است. داده‌های مربوط به سطح زیر کشت، تولید و عملکرد محصولات کشاورزی نیز از آمارنامه‌های سازمان جهاد کشاورزی استان خوزستان استخراج شده است.

گیاهان معرفی شده و بیش از ۸۵ درصد محصولات کشاورزی که در منطقه کشت می‌شود را پوشش می‌دهد، در نتیجه به عنوان ملاک محاسبات نیاز آبی در حوضه آبریز دز قرار گرفته است [۲۱]. معادله فائو - پنمن - مونتیت به صورت رابطه ۱ است.

$$ET_o = \frac{0.408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

که در این معادله، ETO: تبخیر- تعرق مرجع (day/mm)، Rn: تابش خالص در سطح پوشش گیاهی ( $MJ/m^2$  day):

جدول ۲. سطح زیر کشت محصولات کشاورزی بر حسب هکتار در حوضه آبریز دز طی دوره زمانی ۱۳۹۱-۱۳۹۲ تا ۱۳۹۷-۱۳۹۸

نام محصول	سال آبی							
	۱۳۹۸-۱۳۹۷	۱۳۹۷-۱۳۹۶	۱۳۹۶-۱۳۹۵	۱۳۹۵-۱۳۹۴	۱۳۹۴-۱۳۹۳	۱۳۹۳-۱۳۹۲	۱۳۹۲-۱۳۹۱	میانگین چندساله کشت
گندم	۵۳۹۸۸	۴۱۴۳۷	۴۸۵۲۶	۵۳۲۹۱	۶۱۷۶۳	۵۵۴۴۸	۵۳۸۴۵	۵۸۱۴۳
ذرت	۳۳۷۶۰	۲۷۹۹۲	۲۳۴۹۹	۳۳۶۱۳	۳۱۱۳۸	۳۴۲۱۲	۴۱۲۴۴	۳۴۳۶۱
نیشکر	۳۲۰۰۸	۲۹۱۹۵	۲۷۴۶۲	۲۹۲۲۰	۳۳۳۵۰	۳۳۶۷۰	۳۳۱۰۸	۳۳۵۰۸
جمع	۱۱۹۷۵۶	۹۸۶۲۴	۹۹۴۸۶	۱۱۶۱۲۵	۱۲۶۲۵۱	۱۲۳۳۳۰	۱۲۸۱۹۷	۱۲۶۰۱۱
ترکیب کشت	۷۴	۶۴	۷۰	۷۵	۷۷	۷۵	۷۶	۷۶
کاهو- کرفس- کلم	۵۴۵۲	۴۴۸۳	۵۷۲۵	۴۶۹۷	۵۵۲۱	۵۵۰۰	۶۷۳۵	۵۷۷۵
ماش	۴۹۱۹	۶۴۷۶	۲۶۳۶	۲۸۸۹	۴۶۵۴	۵۱۲۱	۴۹۴۴	۵۴۳۳
باغ‌ها - مرکبات	۴۵۲۹	۴۹۰۰	۴۶۵۱	۴۱۷۸	۵۱۴۳	۵۱۰۱	۴۰۴۹	۳۸۰۵
برنج (شلتوک)	۴۳۱۵	۱۰۶۳۱	۴۴۳۲	۴۴۱۴	۲۲۶۸	۲۵۸۴	۳۰۴۱	۲۹۵۴
چغندر قند	۳۳۸۸	۷۷۵۵	۷۷۷۰	۶۲۹۵	۳۱۴۶	۲۲۱۹	۹۰۲	۱۲
سبزی	۳۱۰۰	۳۳۷۷	۳۴۸۷	۳۰۷۲	۲۹۵۳	۳۰۵۶	۳۱۳۹	۳۰۰۰
هویج	۲۷۱۴	۲۴۹۵	۲۸۸۵	۳۳۸۳	۲۹۵۲	۲۳۵۹	۲۷۰۳	۲۳۹۰
کلزا	۲۳۳۹	۳۸۸۴	۳۱۶۲	۲۰۵۳	۲۰۶۸	۲۰۴۲	۲۳۵۳	۱۶۳۲
خربزه - هندوانه	۲۲۰۱	۳۱۰۵	۷۲۴	۱۶۲۳	۱۲۲۵	۲۴۴۲	۲۱۴۶	۲۶۶۹
سایر محصولات	۹۴۷۷	۹۲۴۶	۸۱۷۰	۶۴۲۷	۸۰۶۶	۹۷۵۱	۱۱۴۷۷	۱۱۸۹۷
جمع	۴۲۴۳۴	۵۶۳۵۱	۴۳۶۴۴	۳۹۰۳۰	۳۷۹۹۵	۴۰۱۷۳	۴۱۴۸۷	۳۹۵۶۶
ترکیب کشت	۲۶	۳۶	۳۰	۲۵	۲۳	۲۵	۲۴	۲۴
جمع کل	۱۶۲۱۹۰	۱۵۴۹۷۵	۱۴۳۱۳۰	۱۵۵۱۵۴	۱۶۴۲۴۶	۱۶۳۵۰۴	۱۶۹۶۸۴	۱۶۵۵۷۸

غیر صحیح منجر به تلفات آب در مدیریت آبیاری می‌شود. مشکلات و چالش‌های آبیاری در صورت تخمین صحیح مقدار تبخیر- تعرق گیاه، به حداقل خواهد رسید [۲۲].

### محاسبه ردپای آب

ردپای کل آب برای محصولات زراعی و باغی در حال رشد حاصل جمع دو جزء ردپای آبی و ردپای آب سبز است (رابطه ۲). ردپای آب در بخش کشاورزی برحسب مترمکعب بر تن بیان می‌شود که معادل لیتر بر کیلوگرم است. جزء سبز ردپای آب در تولید یک محصول، از تقسیم جزء آب سبز مصرفی گیاه به متوسط عملکرد محصول محاسبه می‌شود. جزء آبی نیز به همین راه محاسبه می‌شود.

کشاورزان، کارشناسان کشاورزی و ترویج، هیدرولوژیست‌ها، هواشناسان کشاورزی، کارشناسان و مدیران منابع، توزیع و مصرف آب با مسئله تبخیر- تعرق و به بیان دیگر، مقدار آب واقعی مصرف شده توسط یک پوشش گیاهی مواجه هستند، بنابراین تعیین صحیح عرضه آب آبیاری برای توسعه پایدار و مدیریت کشاورزی مهم است. در این میان، تعیین تبخیر- تعرق نقش کلیدی دارد و از اهمیت زیادی برخوردار است. از سوی دیگر، از تبخیر- تعرق برای شناخت اکوسیستم، مدیریت سیلاب و مدیریت توسعه شهری نیز استفاده می‌شود. از تمام آبی که جذب گیاه می‌شود، تقریباً ۹۵ درصد آن با تعرق تلف می‌شود و فقط ۵ درصد یا کمتر در خود گیاه به مصرف می‌رسد. بنابراین، تخمین صحیح تبخیر- تعرق گیاه اهمیت زیادی دارد و برآورد

مانند AHP است. از این تکنیک می‌توان برای رتبه‌بندی و مقایسه گزینه‌های مختلف و انتخاب بهترین گزینه و تعیین فواصل بین گزینه‌ها و گروه‌بندی آنها استفاده کرد. از جمله مزیت‌های این روش آن است که معیارها یا شاخص‌های به‌کاررفته برای مقایسه می‌توانند دارای واحدهای سنجش متفاوتی بوده و طبیعت منفی و مثبت داشته باشند. به بیان دیگر، می‌توان از شاخص‌های منفی و مثبت به شکل ترکیبی در این تکنیک استفاده کرد. بر اساس این روش، بهترین گزینه یا راه حل، باید کمترین فاصله را از راه حل مثبت-ایده‌آل و طولانی‌ترین فاصله از راه حل منفی-ایده‌آل داشته باشد. راه حل ایده‌آل، راه حلی است که دارای بیشترین سود و کمترین هزینه است، در حالی که راه حل غیر ایده‌آل، راه حلی است که بیشترین هزینه و کمترین سود را داشته باشد. مراحل اجرای الگوریتم TOPSIS عبارت‌اند از:

**گام اول:** تشکیل ماتریس داده‌ها بر اساس  $n$  شاخص و  $m$  گزینه و تبدیل معیارهای کیفی به کمی، که در این تحقیق ۳ شاخص و ۱۸ گزینه وجود دارد.

**گام دوم:** نرمالیزه کردن ماتریس تصمیم از طریق نرم اقلیدسی (رابطه ۹):

$$r_{ij} = \frac{f_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^J f_{ij}^2}} \quad j = 1, \dots, J \quad i = 1, \dots, n \quad (9)$$

**گام سوم:** ماتریس بی‌مقیاس موزون:

ابتدا اوزان شاخص‌ها را به شیوه آنتروپی شانون، محاسبه می‌شود (روابط ۱۰-۱۴):

$$P_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{j=1}^n a_{ij}} \quad (10)$$

$$k = \frac{1}{\ln 19} \quad (11)$$

$$E_j = -k \sum [P_{ij} \ln p_{ij}] \quad (12)$$

$$D_j = 1 - E_j \quad (13)$$

$$W_j = \frac{d_j}{\sum d_j} \quad (14)$$

تشکیل ماتریس بی‌مقیاس موزون ( $v_{ij}$ ) با ضرب ماتریس بی‌مقیاس شده ( $r_{ij}$ ) در ماتریس قطری وزن‌ها ( $w_i$ ) (رابطه ۱۵):

$$v_{ij} = w_i \times r_{ij} \quad j = 1, \dots, J \quad i = 1, \dots, n \quad (15)$$

$w_i$  وزن شاخص  $i$  ام است، جمع اوزان شاخص‌ها برابر ۱ است.

**گام چهارم:** ایده‌آل‌های مثبت و منفی برای هر شاخص: تعیین راه حل ایده‌آل مثبت ( $A^*$ ) و منفی ( $A^-$ ) به صورت روابط ۱۶ و ۱۷:

$$WF_{proc} = WF_{proc,green} + WF_{proc,blue} \quad (2)$$

$$WF_{proc,green} = \frac{CWU_{green}}{Y} \quad (3)$$

$$WF_{proc,blue} = \frac{CWU_{blue}}{Y} \quad (4)$$

که در آن  $WF_{proc}$ ، ردپای آب ( $m^3/ton$ )،  $WF_{proc,green}$  و  $WF_{proc,blue}$  به ترتیب ردپای آب سبز و آب آبی ( $m^3/ton$ )،  $CWU_{green}$  و  $CWU_{blue}$  به ترتیب جزء آب سبز و آب آبی گیاه ( $m^3/ha$ ) و  $Y$  عملکرد محصول ( $ton/ha$ ) است. اجزای آب سبز و آبی مصرفی گیاه ( $CWU$ )، از مجموع تبخیر-تعرق روزانه در تمام دوره رشد گیاه به صورت روابط ۵ و ۶ محاسبه می‌شوند:

$$CWU_{green} = 10 \sum_{d=1}^{lgp} ET_{green}$$

$$CWU_{blue} = 10 \sum_{d=1}^{lgp} ET_{blue} \quad (6)$$

که در آن  $ET_{green}$  نشان‌دهنده تبخیر-تعرق آب سبز و  $ET_{blue}$  نشان‌دهنده تبخیر-تعرق آب آبی است. عدد ۱۰ نیز به منظور تبدیل عمق آب در میلی‌متر به حجم آب در سطح زمین بر حسب ( $m^3/ha$ ) است. مجموع تبخیر-تعرق از روز اول کاشت تا روز برداشت محصول و  $lgp$  طول دوره رشد در واحد روز را نشان می‌دهد. تبخیر-تعرق آب سبز یعنی تبخیر-تعرق حاصل از بارش را می‌توان با حداقل مقدار بین تبخیر-تعرق گیاه ( $ET_c$ ) و بارش مؤثر ( $P_{eff}$ ) برابر در نظر گرفت.

تبخیر-تعرق آب آبی نیز مساوی تبخیر-تعرق گیاه منهای بارش مؤثر است، اما زمانی که بارش مؤثر بیش از تبخیر-تعرق گیاه باشد، مقدار آن صفر است (Dota and Theodossiou, 2014).

$$ET_{green} = \min(ET_c, P_{eff}) \quad (7)$$

$$ET_{blue} = \max(0, ET_c - P_{eff}) \quad (8)$$

همچنین، درخور یادآوری است که ردپای آب آبی محصولات تولیدی به آب آبیاری مرتبط است و از طریق نیاز آبیاری در سطح زیرکشت واقعی در هر سال محاسبه می‌شود. نیاز آبیاری نیز با توجه به نوع محصول و بارندگی طی سال متفاوت بوده و کاملاً مبتنی بر وضعیت واقعی محصولات کشاورزی است. ردپای آب سبز نیز به بارندگی مؤثر مرتبط است.

## روش تحلیل تاپسیس

تکنیک تاپسیس (TOPSIS) یا اولویت‌بندی بر اساس شباهت به راه حل ایده‌آل، یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره

$$D_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (V_{ij} - V_j^-)^2}, j = 1, \dots, J \quad (19)$$

$$A^+ = \{V_1^*, \dots, V_n^*\} = \{(\max_j V_{ij} | i \in I'), (\min_j ij | i \in I'')\} \quad (16)$$

گام ششم: میزان نزدیکی نسبی:

تعیین نزدیکی نسبی ( $C_j^*$ ) یک گزینه به راه حل ایده‌آل (رابطه ۲۰):

$$C_j^* = \frac{D_j^-}{D_j^+ + D_j^-}, j = 1, \dots, J \quad (20)$$

رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس نزدیکی نسبی ( $C_j^*$ ) گزینه‌ای که، ( $C_j^*$ ) آن بزرگ‌تر باشد، بهتر است.

$$A^- = \{V_1^-, \dots, V_n^-\} = \{(\min_j ij | i \in I'), (\max_j V_{ij} | i \in I'')\} \quad (17)$$

گام پنجم: به دست آوردن میزان فاصله ایده‌آل:

میزان فاصله هر گزینه تا ایده‌آل‌های مثبت و منفی تعیین می‌شود. فاصله هر گزینه تا ایده‌آل مثبت ( $D_j^*$ ) و منفی ( $D_j^-$ ) به صورت روابط ۱۸ و ۱۹:

$$D_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^n (V_{ij} - V_j^*)^2}, j = 1, \dots, J \quad (18)$$

جدول ۳. متغیرهای استفاده‌شده برای محاسبه ردپای آب محصولات غالب کشاورزی

محصول نام	محصول عملکرد (هکتار در تن)	آبیاری نیاز (مترمکعب در هکتار)	موثر بارندگی (مترمکعب در هکتار)	آبی نیاز (مترمکعب در هکتار)	آبی آب ردپای (m <sup>3</sup> /ton)	سبز آب ردپای (m <sup>3</sup> /ton)	کل ردپای (m <sup>3</sup> /ton)
گندم	۴/۱	۲۳۰۰	۹۸۰	۳۲۸۰	۵۶۱	۲۳۹	۸۰۰
ذرت	۶/۸	۴۷۵۰	۰	۴۷۵۰	۶۹۶	۰	۶۹۶
نیشکر	۸/۵	۱۲۴۳۰	۱۵۵۰	۱۳۹۸۰	۱۴۶۲	۱۸۲	۱۶۴۵
کاهو	۴۸/۱	۲۶۴۲	۲۳۰	۲۸۷۲	۵۵	۵	۶۰
ماش	۱/۳	۶۴۵۰	۳۲	۶۴۸۲	۴۹۴۵	۲۵	۴۹۷۰
مرکبات	۱۱/۸	۹۲۰۰	۱۰۰۰	۱۰۲۰۰	۷۸۲	۸۵	۸۶۷
شلتوک	۴/۳	۱۱۴۷۰	۰	۱۱۴۷۰	۲۶۷۱	۰	۲۶۷۱
چغندر قند	۴۳/۸	۳۳۷۰	۱۲۲۰	۴۵۹۰	۷۷	۲۸	۱۰۵
سبزی	۳۴/۹	۱۵۱۸	۱۲۴۶	۲۷۶۴	۴۳	۳۶	۷۹
هویج	۳۸/۱	۱۴۸۶	۱۱۲۲	۲۶۰۸	۳۹	۲۹	۶۹
کلزا	۱/۷	۲۰۳۵	۱۵۰۵	۳۵۴۰	۱۲۲۷	۹۰۸	۲۱۳۵
هندوانه	۲۸/۸	۳۷۷۰	۰	۳۷۷۰	۱۳۱	۰	۱۳۱

## نتایج و بحث

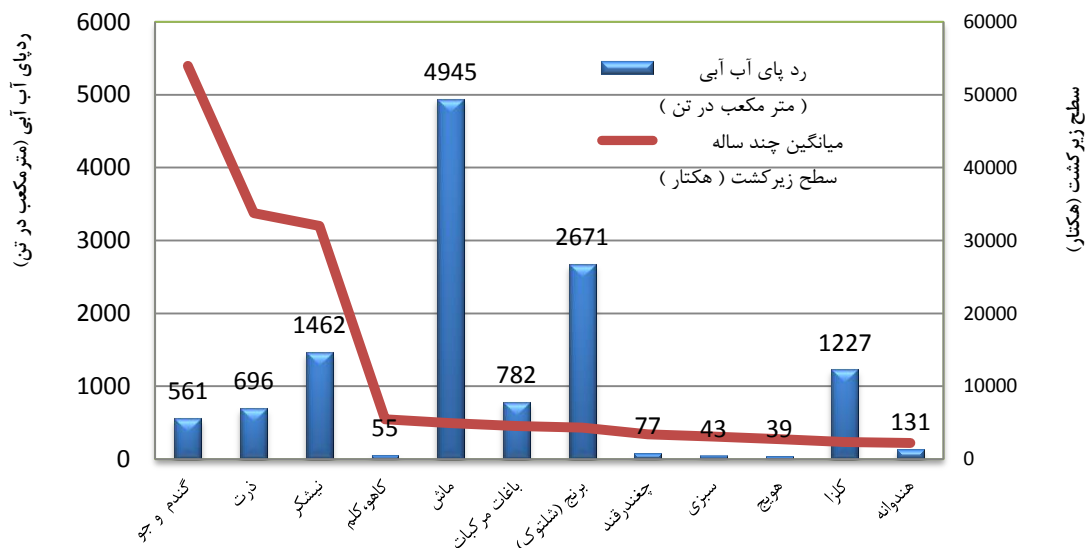
### تحلیل ردپای آب محصولات در منطقه مطالعه‌شده

محاسبه ردپای آب محصولات غالب کشاورزی در جدول ۳ نشان داده شده است. جدول ۴، اجزای ردپای آب آبی و سبز محصولات غالب کشاورزی را نشان می‌دهد. شکل ۱ مقایسه ردپای آب آبی محصولات کشاورزی و میانگین چندساله سطوح کشت در حوضه آبریز دز را نشان می‌دهد. شکل ۲ مقایسه ردپای آب آبی و سبز محصولات کشاورزی در حوضه آبریز دز را نشان می‌دهد.

ردپای آب به عنوان روشی برای نشان دادن مصرف آب و اثرات سیستم‌های تولید روی منابع آب معرفی شده است. ردپای آب در کشاورزی از سه جزء آب سبز (آب باران)، آب آبی (آب آبیاری) و آب خاکستری (زه‌آب آلوده به مواد شیمیایی) تشکیل شده است. متغیرهای استفاده‌شده برای

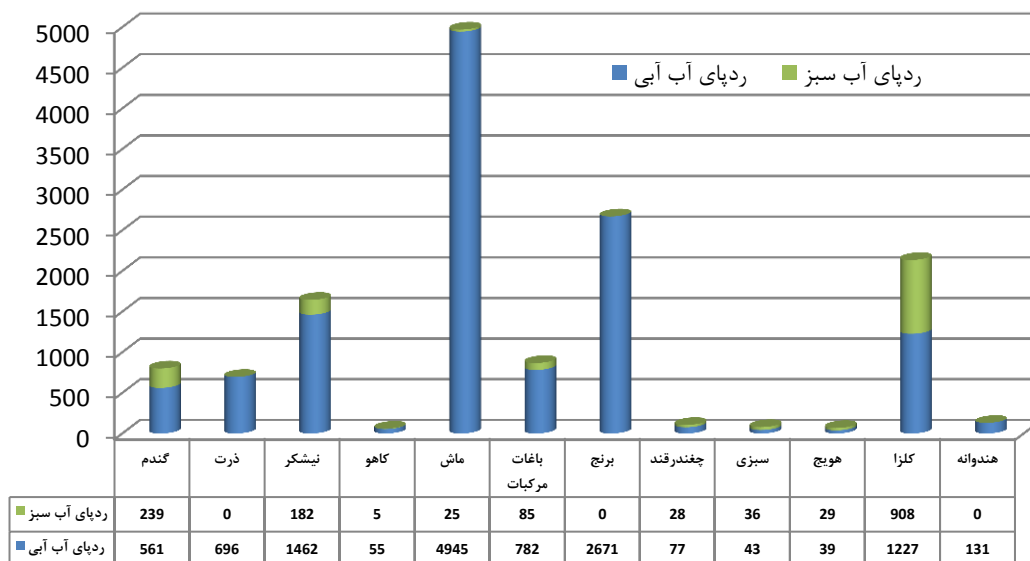
جدول ۴. اجزای ردپای آب محصولات غالب کشاورزی در حوضه آبریز دز

نام محصول	ترکیب کشت (درصد)	ردپای آبی (m <sup>3</sup> /ton)	ردپای آب سبز (m <sup>3</sup> /ton)	ردپای کل (m <sup>3</sup> /ton)	سهم ردپای آب آبی (درصد)	سهم ردپای آب سبز (درصد)	نسبت ردپای آب آبی به ردپای آب سبز
گندم	۳۳/۳	۵۶۱	۲۳۹	۸۰۰	۷۰/۱	۳۰	۲/۳
ذرت	۲۰/۸	۶۹۶	۰	۶۹۶	۱۰۰/۰	۰	-
نیشکر	۱۹/۷	۱۴۶۲	۱۸۲	۱۶۴۵	۸۸/۹	۱۱	۸/۰
کاهو	۳/۴	۵۵	۵	۶۰	۹۲/۰	۸	۱۱/۵
ماش	۳/۰	۴۹۴۵	۲۵	۴۹۷۰	۹۹/۵	۰	۲۰/۱/۶
باغ‌های مرکبات	۲/۸	۷۸۲	۸۵	۸۶۷	۹۰/۲	۱۰	۹/۲
برنج (شلتوک)	۲/۷	۲۶۷۱	۰	۲۶۷۱	۱۰۰/۰	۰	-
چغندر قند	۲/۱	۷۷	۲۸	۱۰۵	۷۳/۴	۲۷	۲/۸
سبزی	۱/۹	۴۳	۳۶	۷۹	۵۴/۹	۴۵	۱/۲
هویج	۱/۷	۳۹	۲۹	۶۹	۵۷/۰	۴۳	۱/۳
کلزا	۱/۴	۱۲۲۷	۹۰۸	۲۱۳۵	۵۷/۵	۴۳	۱/۴
هندوانه	۱/۴	۱۳۱	۰	۱۳۱	۱۰۰/۰	۰	-



شکل ۱. مقایسه ردپای آب آبی محصولات کشاورزی و میانگین چندساله سطوح کشت در حوضه آبریز دز





شکل ۲. مقایسه ردپای آب آبی و سبز محصولات کشاورزی در حوضه آبریز دز

در حالت کلی، نتایج به دست آمده از تحلیل اجزای ردپای آب محصولات مورد ارزیابی نشان می‌دهد که جزء ردپای آب آبی از ردپای آب سبز، بیشتر است و درصد سهم ردپای آب آبی نسبت به ردپای آب سبز بیش از ۵۰ درصد بوده و در برخی محصولات این نسبت به ۱۰۰ درصد نیز می‌رسد که این امر بیانگر آن است که بیشترین نیاز آبی محصولات از طریق آبیاری تأمین می‌شود و اتکالی تولید محصولات زراعی و باغی بر استفاده از منابع آب سطحی (چه در بخش شبکه و چه در بخش رودخانه)، بیشتر است.

بیشترین شاخص ردپای آبی محصولات به ترتیب مربوط به ماش، برنج، نیشکر و کلزا بوده که به ترتیب معادل ۴۹۴۵، ۲۶۷۱، ۱۴۶۲ و ۱۲۲۷ مترمکعب در تن، ردپای آبی را به خود اختصاص دادند و این در حالی است که میانگین سطح زیر کشت ماش و برنج، نسبت به سطح کل منطقه، ارقام بالایی نیستند، ولی با توجه به اینکه، این دو محصول، جزء محصولات تابستانه هستند و با توجه به زیاد بودن شاخص ردپای آبی آنها، برای کشت تابستانه در این منطقه، باید مورد توجه اقتصادی قرار گیرند.

همچنین، کشت نیشکر که سطح قابل توجهی از منطقه را پس از گندم و ذرت به خود اختصاص داده و سطح وسیعی از اراضی منطقه با برآورد تقریبی ۲۰ درصد را در بر گرفته است، ردپای آبی آن معادل ۱۴۶۲ مترمکعب در تن به دست آمد، که از ردپای آبی به دست آمده برای ذرت و گندم

با توجه به اینکه شاخص ردپای آب بیانگر میزان نیاز آبی هر محصول بر مقدار تناژ در هکتار آن محصول است و بر حسب متر مکعب بر تن بیان می‌شود، محاسبه ردپای آبی محصولات آمده در جدول ۴ از مقادیر سهم نیاز آبی آن محصول از عملکرد در هکتار و ردپای آب سبز هم از مقادیر بارندگی مؤثر طی دوره رشد آن گیاه بر عملکرد محصول به دست آمده است. ردپای آب کل نیز حاصل جمع دو جزء ردپای آب آبی و ردپای آب سبز است که با توجه به داده‌های موجود درصد سهم اجزای ردپای آب آبی و آب سبز نسبت به ردپای آبی کل محاسبه شد.

این مطالعه ردپای آب در دو جزء آب آبی و آب سبز برای محصولاتی که بالاترین میانگین سطح زیر کشت را طی چند سال اخیر داشته و به عنوان محصولات غالب منطقه به شمار می‌روند، بررسی کرده است.

براساس مطالعات انجام شده؛ سه محصول گندم، نیشکر و ذرت، بیشترین سطح زیر کشت را دارد، به طوری که مجموع سطوح کشت این سه محصول بیش از ۷۰ درصد ترکیب کشت منطقه را شامل می‌شود. بنابراین، نه تنها مدیریت آبیاری این سه محصول می‌تواند در مدیریت بهینه آب در کل منطقه تأثیرگذار باشد، بلکه باید ردپای آب سایر محصولات نیز مورد توجه و بررسی قرار گیرد تا مدیریت کشت سایر محصولات نیز به درستی صورت پذیرد.

تحقیق نشان داد در میان تمام دشت‌های استان، دشت کرمانشاه در بخش تولیدات زراعی و باغی بیشترین سهم ردپای آب را داشت و همه دشت‌ها با هم نتایج یکسانی نداشتند. همچنین، آنها دریافتند که بیشترین نیاز آبی ذرت از طریق آبیاری تأمین شده است و باید کشت آن مورد توجه اقتصادی قرار گیرد و نتایج برای کنگد و حبوبات نیز به بیشترین ردپای آب آبی اشاره دارد. در حالی که در مطالعه جهانی انجام شده توسط هوکسترا و چاپاگین (2007)، برخی محصولات مهم کشاورزی مانند گندم بیشترین سهم جهانی ردپای آب مصرفی را بعد از برنج (767) گیگا مترمکعب در سال (به خود اختصاص داده است).

### تحلیل راهبردها به روش تاپسیس

بر اساس میزان ردپای آب به دست آمده برای محصولات اساسی در حوضه آبریز دز، در ادامه به مدیریت منابع آب، انرژی و غذا با استفاده از روش تحلیلی TOPSIS پرداخته شده است. در فرایند ارزیابی راهبردهای مدیریت منابع آب، انرژی و غذا، ابتدا به منظور شناخت معیارها و راهبردهای مهم و اولویت‌دار از نظر گروه، از میان مجموع معیارها و راهبردهای پیشنهادی، از روش دلفی و تهیه پرسشنامه استفاده شد و از این میان، ۳ معیار و ۱۸ راهبرد نهایی از ۱۵ کارشناس خبره شرکت آب و فاضلاب و جهاد کشاورزی استان خوزستان نظرخواهی شد؛ که این فرایند توسط طیف ساعتی صورت گرفته است.

روایی پرسشنامه از طریق پرسش از اساتید و کارشناسان فن ارزیابی و تأیید شد. برای ارزیابی پایایی پرسشنامه از ضریب آلفای کرونباخ استفاده شد که به صورت رابطه ۲۱ است:

$$\alpha = \left( \frac{k}{k-1} \right) \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^k s_i^2}{s^2} \right) \quad (21)$$

که در آن،  $k$  تعداد گویه‌ها،  $s^2$  واریانس جمع نمره‌های هر پاسخ‌گو و  $s_i^2$  واریانس نمرات مربوط به گویه شماره  $i$  ام است. مقدار ضریب آلفای کرونباخ برای سؤال‌های پرسشنامه 72/0 به دست آمد که با توجه به اینکه این ضریب بزرگ‌تر از 7/0 است، بنابراین پرسشنامه از روایی برخوردار است.

به منظور مدیریت منابع آب، انرژی و غذا، راهبردها و معیارهای مهم و اولویت‌دار از نظر گروه انتخاب و به منظور ترسیم نمودار سلسله‌مراتب تصمیم‌گیری و تهیه پرسشنامه مقایسات زوجی در نظر گرفته شدند. پس از مشخص شدن

به ترتیب معادل ۶۹۶ و ۵۶۱ مترمکعب در تن، بیشتر بوده و از این منظر می‌تواند در تحلیل منابع آبی منطقه، بسیار تأثیرگذار باشد.

نتایج در خصوص محصول کلزا نیز نشان می‌دهد این محصول هر چند از ردپای آبی زیادی (معادل ۱۲۲۷ مترمکعب در تن) برخوردار است، اما سهم ردپای آب سبز آن نیز معادل ۹۰۸ مترمکعب در تن برآورد شده است که تفاوت چندانی با سهم ردپای آب آبی ندارد و این امر به دلیل بهره‌گیری از آب حاصل از بارندگی در فصل پاییز است.

در رتبه‌های بعدی بیشترین شاخص ردپای آب، مربوط به باغ‌ها، ذرت و گندم به ترتیب با شاخص ردپای آبی ۷۸۲، ۶۹۶ و ۵۶۱ مترمکعب در تن هستند و از دیگر نتایج به دست آمده در این مطالعه می‌توان به این نکته اشاره کرد که گندم بیشترین ردپای آب سبز را به خود اختصاص داده است و درصد سهم ردپای آب سبز گندم معادل ۳۰ درصد، ذرت معادل صفر درصد و باغ‌ها معادل ۱۰ درصد است.

محصولاتی نظیر چغندر قند، کاهو، سبزی و هویج به ترتیب با شاخص ردپای آبی ۷۷، ۵۵، ۴۳ و ۳۹ مترمکعب در تن کمترین شاخص‌های ردپای آبی را در بین سایر محصولات یادشده، دارند و افزایش کشت آنها به‌ویژه برای محصولاتی نظیر سبزی و هویج به ترتیب با سهم ردپای آب سبز ۳۶ و ۲۹ مترمکعب در تن، قابل توجه است و توجه می‌شود. بنابراین، کشت این محصولات در صورتی که با محدودیت منابع آب به منظور تأمین نیاز آبی آنها و یا سایر محدودیت‌ها مانند (بازاریابی و صنایع تبدیلی) مواجه نباشند، توصیه می‌شود.

به طور کلی، می‌توان گفت که شاخص ردپای آب به عنوان یک شاخص جهانی نشان‌دهنده مقدار واقعی آب مصرفی بر اساس شرایط و اقلیم هر منطقه است. شاخص ردپای آب متأثر از شرایط مختلف در سطح محلی، منطقه‌ای، استانی و یا جهانی ممکن است، متفاوت باشد. ارقام این شاخص که تحت تأثیر عواملی همچون شیوه کشت و زرع، عملکرد محصول، استفاده از فناوری‌های نوین، نوع سیستم‌های آبیاری، کم‌آبیاری، مالچ‌پاشی، استفاده از وارپته‌های مختلف یک محصول و شدت تبخیر-تعرق متفاوت است، بنابراین نتایج متفاوتی را حتی در یک استان در مقایسه با دشت‌های مختلف آن نشان داده است. برای مثال، گلایی و همکاران (1398) در تحقیقی به بررسی موضوع تعیین الگوی کشت بهینه مبتنی بر شاخص ردپای آب در استان کرمانشاه پرداختند، که نتایج این

جدول ۵. وزن شاخص ها بر اساس پرسشنامه

اولویت	وزن	نام معیار	ردیف
۳	۰/۰۸۵	انرژی	۱
۲	۰/۲۰۳	غذا	۲
۱	۰/۶۷۲	آب	۳

با استفاده از روش تاپسیس به اولویت‌بندی نهایی راهبردهای تأثیرگذار بر مدیریت منابع آب، انرژی و غذا پرداخته شده است (جدول ۶).

معیارها و راهبردهای مهم و اولویت‌دار از نظر گروه، به منظور برآورد وزن نسبی معیارها و راهبردها برای دستیابی به هدف «توسعه پایدار مدیریت منابع آب، انرژی و غذا» از روش دلفی، ماتریس‌های مقایسات زوجی گروهی شکل گرفت. ابتدا اوزان شاخص‌ها را به شیوه آنتروپی شانون وزن‌دهی کرده (جدول ۵)، سپس با استفاده از روش TOPSIS عوامل تأثیرگذار بر مدیریت منابع آب، انرژی و غذا در حوضه آبریز دز، اولویت‌بندی شده است.

جدول ۶. نتایج حاصل از رتبه‌بندی راهبردها

رتبه	cj*	dj-	dj+	گزینه	شرح گزینه
۱	۰/۹۴۰	۰/۱۴۲	۰/۰۰۹	A1	جمع‌آوری و استحصال بهینه منابع آب، غذا و انرژی
۱۴	۰/۴۰۳	۰/۰۵۸	۰/۰۸۶	A2	ایجاد بارش‌های مصنوعی برای تغذیه آبخوان‌ها
۶	۰/۶۱۲	۰/۰۸۸	۰/۰۵۶	A3	تعیین آب‌بها برای تمامی منابع در دسترس
۱۸	۰/۰۷۲	۰/۰۱۱	۰/۱۴۱	A4	ایجاد محیط‌های گلخانه‌ای در راستای بهره‌وری بهینه در تمامی فصول
۷	۰/۶۱۰	۰/۰۸۸	۰/۰۵۶	A5	افزایش مشارکت مردمی
۱۰	۰/۵۵۵	۰/۰۸۳	۰/۰۶۷	A6	به‌کارگیری نیروهای بومی و تکنولوژی‌های جدید کنترل مصرف
۹	۰/۵۵۸	۰/۰۸۴	۰/۰۶۶	A7	تعدیل الگوی مصرف ناپایدار و تغییر و اصلاح شیوه‌های معیشتی مردم
۸	۰/۵۲۵	۰/۰۸۵	۰/۰۵۹	A8	آموزش‌های الگوی بهینه مصرف در بخش‌های مختلف مصارف
۱۶	۰/۲۵۸	۰/۰۳۹	۰/۱۱۲	A9	برخورد قانونی با متخلفان مصارف غیر مجاز
۱۱	۰/۴۳۲	۰/۰۶۳	۰/۰۸۲	A10	تعدیل در برداشت از منابع زیرزمینی
۲	۰/۸۰۰	۰/۱۱۷	۰/۰۲۹	A11	تغییر الگوی آبیاری و اجرای روش‌های کم‌آبخواه
۱۵	۰/۳۷۴	۰/۰۵۵	۰/۰۹۲	A12	جلوگیری از بوته‌کشی و قطع اشجار برای کاهش تبخیر منابع
۱۷	۰/۱۹۲	۰/۰۲۸	۰/۱۱۷	A13	کاهش مصرف سموم کشاورزی آلوده‌کننده منابع
۱۲	۰/۴۲۶	۰/۰۶۲	۰/۰۸۴	A14	معرفی ارقام گیاهی جدید و مقاوم به خشکی و تنش‌های کم‌آبی
۳	۰/۷۹۷	۰/۱۱۵	۰/۰۲۹	A15	سه‌می‌بندی منابع آب کشاورزی
۱۳	۰/۴۰۸	۰/۰۵۹	۰/۰۸۵	A16	توسعه سیستم‌های پایش مستمر منابع آلوده‌کننده محیط زیست
۴	۰/۷۷۳	۰/۱۱۳	۰/۰۳۳	A17	توسعه مدیریت خطرپذیری (ریسک) و بحران برای جلوگیری از نقصان در کمیت و کیفیت منابع آب، غذا و انرژی در راستای بهبود محصولات کشاورزی
۵	۰/۶۲۴	۰/۰۹۲	۰/۰۵۵	A18	بازچرخانی و استفاده مجدد از آب با تأکید بر جایگزینی پساب برای مصارف کشاورزی و فضای سبز (با به‌کارگیری روش‌های نوین استحصال آب)

کشاورزی و فضای سبز با به‌کارگیری روش‌های نوین استحصال آب؛ به عنوان راهبردهای با اهمیت و تأثیرگذار در رده اول تا پنجم قرار گرفته‌اند. همچنین، نتایج به‌دست‌آمده از این تحلیل نشان داد؛ خودکفایی کشاورزی بر مدیریت منابع آب، غذا و انرژی تأثیرگذار بوده، ضمن آنکه نتایج کلی بیانگر آن است که راهبردهای تصمیم‌گیری گروهی بر مدیریت منابع آب، غذا و انرژی، بسیار تأثیرگذار خواهد بود.

بنابراین، با توجه به تحلیل و اولویت راهبردهای مؤثر بر مدیریت منابع آب، غذا و انرژی، پنج معیار جمع‌آوری و استحصال منابع آب، غذا و انرژی، تغییر الگوی آبیاری و اجرای روش‌های کم‌آبخواه، سه‌می‌بندی منابع آب کشاورزی، توسعه مدیریت خطرپذیری (ریسک) و بحران به منظور جلوگیری از نقصان در کمیت و کیفیت منابع آب، غذا و انرژی در راستای بهبود محصولات کشاورزی، بازچرخانی و استفاده مجدد از آب با تأکید بر جایگزینی پساب برای مصارف

## راهکارهای مدیریتی

### • قیمت‌گذاری آب و انرژی

پیشنهاد می‌شود از بهینه‌سازی قیمت‌گذاری آب و انرژی با در نظر گرفتن اهداف ذی‌نفعان مختلف در این عرصه استفاده کرد. به دلیل اینکه برای قیمت‌گذاری منابع که نوعی امر سیاستی تصمیم‌گیری در سطح کلان است، باید منطقی اقتصادی برای تصمیم‌گیری وجود داشته باشد. زمانی که قیمت آب به میزان ارزش واقعی آن افزایش یابد، به دنبال آن کشاورزان الگوهای مصرفی جدیدی برای بهره‌برداری مصرف آب اتخاذ خواهند کرد، که در این صورت محصولات آب‌بر توجیه اقتصادی نخواهند داشت. از طرف دیگر، افزایش هزینه تولید محصولات و به طبع آن افزایش قیمت فروش ممکن است موجب کاهش میزان تقاضای محصولات شود و همچنین، می‌تواند فرهنگ مصرف مواد غذایی در جامعه را اصلاح کند. به این صورت که دورریز مواد غذایی تولیدشده با هزینه بیشتر و تبدیل شدن به زباله در این محصولات کاهش می‌یابد.

### • تدوین الگوی کشت و جانمایی مناسب آن

در تعیین الگوی کشت علاوه بر بررسی مسائل تخصصی و فنی همچون در نظر گرفتن شرایط اقلیمی و میزان آب در دسترس و بافت خاک و کیفیت منابع آب، رعایت تناوب زراعی و نیازهای منطقه‌ای، باید به مسائل بازاریابی محصولات کشاورزی (از جمله نگهداری، درجه‌بندی، بسته‌بندی و حمل‌ونقل) و بازدهی اقتصادی و افزایش کارایی مصرف آب با توجه به کشت محصولات با عملکرد بالا و نیاز آبی کمتر توجه بیشتری شود، زیرا عدم امنیت کشت برای محصولات پردرآمد با سودآوری بیشتر و حجم آب مصرفی کمتر در این بحران بی‌آبی هیچ‌وقت نمی‌تواند آنان را به افزایش کشت آن محصولات ترغیب کند. بنابراین، اصلاح الگوی کشت محصولات کشاورزی و جانمایی مناسب محصولات در منطقه، یکی دیگر از مسائلی است که باید به‌شدت مورد توجه سیاست‌گذاران و تصمیم‌گیرندگان قرار گیرد.

### • اصلاح سیاست‌های واردات و صادرات با رویکرد توجه به

#### آب مجازی و ردپای آب

لزوم توجه به مفهوم آب مجازی در تدوین سیاست‌های واردات و صادرات می‌تواند به عنوان یکی از راه‌حل‌های مواجهه با بحران آب در منطقه مد نظر قرار گیرد. سیاست

تجارت آب مجازی با افزایش واردات محصولات کشاورزی و صنعتی آب‌بر و کاهش صادرات آنها می‌تواند توسط نهادهای امر بررسی شود. نکته بااهمیت در تجارت آب مجازی این است که با افزایش یا کاهش واردات و صادرات به چه میزان از نظر اقتصادی با اهداف ذی‌نفعان تناسب دارد و باید عوامل اقتصادی و اجتماعی (مانند افزایش یا کاهش بیکاری) را نیز مد نظر قرار داد.

### • افزایش محصولات گلخانه‌ای

استفاده از روش‌های علمی و فنی مناسب برای افزایش کارایی مصرف آب کشاورزی از ضروریات بخش کشاورزی است. به عنوان یک راه حل حرکت به سمت تولیدات گلخانه‌ای برای افزایش تولید در واحد سطح و رفع نیازهای غذایی جمعیت می‌تواند راه‌گشا باشد. شرایط خاص اقلیمی منطقه، پایین بودن امکان افزایش منابع جدید آب استفاده‌شده در بخش کشاورزی و ضرورت افزایش تولیدات کشاورزی از منابع آب محدود، از جمله عواملی هستند که ما را به سمت توسعه کشت‌های گلخانه‌ای سوق می‌دهند. براساس جمع‌بندی اطلاعات پرسشنامه‌های تهیه‌شده توسط کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، کارگروه استفاده پایدار از منابع آب برای تولید محصولات کشاورزی نشان می‌دهد میانگین (وزنی) کارایی مصرف آب در ۵۷ درصد گلخانه‌های کشور ۱۸/۷۵ کیلوگرم بر متر مکعب است که ۵ برابر در مزرعه است. عملکرد محصولات گلخانه‌ای به دلیل کنترل عوامل مؤثر بر تولید از جمله کنترل شرایط اقلیمی، برنامه آبیاری و تغذیه، افزایش سطح کشت ناشی از افزایش تراکم بوته، استفاده از حجم گلخانه به جای سطح در مقایسه با شرایط مزرعه افزایش چشمگیری را نشان داده است [۲۳]. وزارت نیرو می‌تواند از طریق ایجاد زیرساخت‌های لازم تأمین انرژی برای احداث گلخانه‌های مکانیزه و در سیاست‌هایی را تدوین کند.

### نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از بررسی انجام‌شده در مبحث ردپای آب محصولات نشان می‌دهد تقریباً برای تمامی محصولات مطالعه‌شده ردپای آب آبی بیشتر از آب سبز بوده است که این خود وابستگی تولیدات محصولات کشاورزی به منابع آب سطحی را نشان می‌دهد. از طرفی، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد هر چه ردپای آب محصولات کمتر باشد، عملکرد آنها به ازای آب مصرفی مطلوب‌تر خواهد بود. در این مطالعه برخی محصولات به دلیل

## منابع

- [1]. Mirabi M, Karabi M. Integrated modeling in the optimal management of water, energy and food resources with a correlated approach. 2019; 11th National Congress of Civil Engineering, Shiraz. [Persian]
- [2]. Summit E. Agenda 21. The United Nations programme for action from Rio. (United States Congress, 1990. Food, Agriculture, Conservation, and Trade Act of 1990, Public Law 101-624. Title XVI, Subtitle A, Section 1603. Washington, DC: US Government). 1992.
- [3]. FAO. Energy-smart food for people and climate. Issue Paper. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2011.
- [4]. IEA. World Energy Outlook 2010. Paris: OECD/International Energy Agency. 2010.
- [5]. HIPE. Water for Food Security and Nutrition. A Report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security. HPLC Report No. 9. Rome. 2015.
- [6]. Millennium ecosystem assessment ME. Ecosystems and human well-being. Washington, DC: Island press. 2005 Aug 27.
- [7]. Hoekstra AY, Chapagain A, Martinez-Aldaya M, Mekonnen M. Water footprint manual: State of the art. 2009.
- [8]. Ababaei B, Ramezani Etedali H. Estimation of Water Footprint Compartments in National Wheat Production, Water and Soil. 2016; 29(6): 1458-1468.
- [9]. Mays LW. Water resources sustainability. 1st ed. McGraw-Hill, New York; 2007.
- [10]. Mahdavi T, Hosseini S. Aquifers Sustainability assessment by Integrated Groundwater Footprint Indicator Case Study: East Azerbaijan Province. Iran-Water Resources Research, 2019; 15(4): 438-452. [Persian]
- [11]. Bagheri A. Water resources management with a water, energy and food nexus approach. The 1<sup>st</sup> international conference on water demand management and efficiency, Hamedan. 2018. [Persian]
- [12]. Mekonnen MM, Hoekstra AY. Water footprint benchmarks for crop production: A first global assessment. Ecological indicators. 2014 Nov 1; 46:214-23.
- [13]. Chouchane H, Hoekstra AY, Krol MS, Mekonnen MM. The water footprint of Tunisia from an economic perspective. Ecological indicators. 2015 May 1; 52:311-9.
- [14]. Rodriguez CI, de Galarreta VR, Kruse EE. Analysis of water footprint of potato production in the pampean region of Argentina. Journal of Cleaner Production. 2015 Mar 1; 90:91-6.
- [15]. Su MH, Huang CH, Li WY, Tso CT, Lur HS. Water footprint analysis of bioethanol energy

کم بودن میزان عملکرد در هکتارشان، بیشترین ردپای آب را به خود اختصاص داده‌اند. بنابراین، علاوه بر انتخاب نوع محصولات زراعی با عملکرد بیشتر، می‌توان از طریق افزایش کارایی مصرف آب، افزایش استفاده مؤثر از بارش، بهینه‌سازی عملیات کشت و استفاده از فناوری‌های نوین، برای کاهش ردپای آب محصولات، گام‌های مؤثری برداشت. بنابراین، در مجموع می‌توان بیان کرد که اطلاع از نیاز آبی و میزان مصرف معقول آب محصولات کشاورزی به منظور هرگونه برنامه‌ریزی در مدیریت بهینه و تخصیص صحیح منابع آب و رسیدن به تعادل آبی متناسب با منابع موجود و بررسی و انتخاب محصولات زراعی و باغی با کمترین ردپای آب و عملکرد بالا، توجه به مدیریت منابع آب با رویکرد نکسوس با تمرکز برکشت گیاهان استراتژیکی مانند گندم، همچنین افزایش راندمان شبکه‌های آبیاری مدرن و بهینه کردن روش سنتی آبیاری، امری ضروری است و توصیه می‌شود با برنامه‌ریزی کلان و صحیح در بخش کشاورزی، ضمن استفاده از پتانسیل‌های منطقه برای حفظ و ذخیره‌سازی منابع آبی تلاش کرد تا بتوان به سوی توسعه پایدار قدم برداشت. همچنین، با توجه به نتایج پژوهش، پیشنهاد می‌شود برای انجام تحقیقات آتی مواردی همچون تعیین ترکیب کشت بهینه با توجه به محدودیت‌های اقتصادی، اجتماعی و منابع آب محدود، جدا کردن آب شرب از سایر مصارف، ارتقای سطح فرهنگ صرفه‌جویی در مصرف آب در بخش کشاورزی، مد نظر قرار گیرد و مطالعاتی در قالب بخش «مدیریت منابع و اقتصاد آب» در زمینه‌های برنامه‌ریزی و مدیریت به‌هم‌پیوسته منابع و مصارف آب با رویکرد نکسوس، تدوین اسناد آبی توسعه بخشی و منطقه‌ای، تهیه برنامه‌های آمایش سرزمین، مطالعات سازمانی و نهادی مدیریت بخش آب، مطالعات حقوقی و قانونی بخش آب، بررسی راهکارهای حل تعارض در بهره‌برداری از منابع آب، محاسبه قیمت تمام‌شده مالی و اقتصادی آب، انجام مطالعات خصوصی‌سازی در بخش آب، مطالعات سرمایه‌گذاری در بخش آب، استفاده از ابزارهای مدیریت اقتصادی آب برای دستیابی به بهره‌وری بیشتر در بخش کشاورزی و صنعت، بررسی آثار سیاست‌های کلان اقتصادی بر بخش آب پیشنهاد می‌شود.

## تقدیر و تشکر

نویسندگان از سازمان آب و برق خوزستان و معاونت حفاظت و بهره‌برداری از منابع آب و سازمان جهاد کشاورزی به دلیل همکاری و در اختیار گذاشتن آمار و اطلاعات تشکر می‌کنند.

- information system preparation committee and evaluation of irrigation networks. 2002. [Persian]
- [20]. Ministry of Jihad Agriculture, Deputy of Planning and Economy. Information and Communication Technology Center, Crop Products, 2016-2017 Crop Year. Statistics. 2017.
- [21]. Agricultural Research, Education and Extension Organization. Institute of Agricultural Technical Research and Engineering. Pattern of water consumption in agriculture (national document). 1997.
- [22]. Soil and Water Research Institute. Updating water demands of crops and gardens of the country (Case study: Khuzestan province). 2016.
- [23]. Entesari HR, Heidary N, Kheirabi J, Alai M, Farshi AA, Vaziri J. Water use efficiency in greenhouse production. Iranian National Committee on Irrigation and Drainage (IRNCID). 2007.
- crops in Taiwan. Journal of cleaner production. 2015 Feb 1;88:132-8.
- [16]. Hoseini S, Delavar M. Application and Evaluation of Water, Food and Energy (NEXUS) in Irrigation Networks Management Case Study of Zayandehrud Irrigation Network. Iranian Journal of Irrigation & Drainage. 2020; 14(1): 275-285. [Persian]
- [17]. Eslami Z, Janat Rostami S, Ashraf zadeh A. Application of modeling in managing the relationship between water, food and energy nexus. Water and sustainable development, 2020.
- [18]. Golabi M, farzi S, radmanesh F. The determination of optimal cultivation pattern according to Water Footprint Index(case study: Kermanshah province). Iranian Journal of Irrigation & Drainage. 2019; 13(3): 588-602. [Persian]
- [19]. Khuzestan Water and Power Organization (KWPO). Expert report on the performance of the