

## Optimization of Crop Pattern Based on Water Footprint Index in Different Climates of Iran

TOHID ALIGHOLINIA<sup>1\*</sup>, KHALIL GHORBANI<sup>1</sup>, HOSEIN REZAEI<sup>2</sup>, GHORBAN GHORBANI NASR ABAD<sup>3</sup>

1. Water Engineering Department, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

2. Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.

3. Cotton Research Institute of Iran, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Gorgan, Iran.

(Received: Apr. 13, 2020- Revised: Oct. 31, 2020- Accepted: Nov. 22, 2020)

### ABSTRACT

One of the basic elements of water resources management and increasing agricultural productivity is the optimal use of (water) resources. The water footprint index is one of the new approaches used for this purpose. In this study, the water footprint approach was used to optimize the cultivation pattern of crops in different climates of Iran. For this purpose, 11 crops were selected in six different climates of Iran and after calculating the water footprint of the cultivated crops, the RIS indicators and the actual blue water footprint ( $WFA_{blue}$ ) were evaluated. After evaluating and calculating the indicators, the TOPSIS optimization method was used to provide the optimal cultivation pattern. Results showed that among the proposed products, wheat, barley, alfalfa, cotton, and tobacco had the highest amount of green water footprint, of which the highest one was corresponded to the PH-C-W climate. However, the highest blue and gray water footprint are mainly related to rice, beans, cotton and tobacco, which is due to the high water consumption of these products (high water demand). Evaluation of the optimization model also showed that the most optimal crops for cultivation in the region were respectively corn with 39%, barley with 23%, potato with 20%, tomato with 7% and wheat with 1% priorities. The most undesirable crops for cultivation in the provinces of the country were respectively, tobacco, cotton, beans, rice, sugar beet and alfalfa.

**Keywords:** Climate, Cultivation Pattern, TOPSIS, WF, UNESCO.

## بهینه‌سازی الگوی کشت بر مبنای شاخص رد پای آب در اقلیم‌های مختلف ایران

توحید علیقلی‌نیا<sup>۱\*</sup>، خلیل قربانی<sup>۱</sup>، حسین رضایی<sup>۲</sup>، قربان قربانی نصرآباد<sup>۲</sup>

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

۲. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۲. موسسه تحقیقات پنبه کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱/۲۵ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۸/۱۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۹/۲)

### چکیده

یکی از ارکان‌های اساسی مدیریت منابع آب و افزایش بهره‌وری کشاورزی، استفاده بهینه از منابع (آبی) می‌باشد. شاخص رد پای آب یکی از رویکردهای جدید است که بدین منظور مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق از رویکرد رد پای آب جهت بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات زراعی در اقلیم‌های مختلف ایران استفاده شد. برای این منظور ۱۱ محصول زراعی در شش اقلیم مختلف ایران انتخاب شده و ضمن محاسبه رد پای آب محصولات زراعی مورد کشت، به ارزیابی شاخص‌های RIS و رد پای آب آبی واقعی (WFA<sub>blue</sub>) پرداخته شد. پس از ارزیابی و محاسبه شاخص‌ها، از روش بهینه‌سازی تاپسیس به منظور ارائه الگوی کشت بهینه استفاده گردید. نتایج نشان داد که در بین محصولات مورد بررسی، گندم، جو، یونجه، پنبه و توتون محصولاتی هستند که بیشترین مقدار رد پای آب سبز را دارند که بالاترین مقدار آن نیز در اقلیم PH-C-W (خیلی مرطوب خنک گرم) می‌باشد. این در حالی است که بیشترین مقدار رد پای آب آبی و خاکستری، عمدتاً مربوط به برنج، لوبیا، پنبه و توتون می‌باشد که به دلیل مصرف آب بالای این محصولات (نیاز آبی بالا) می‌باشد. ارزیابی مدل بهینه‌سازی نیز نشان داد که، بهینه‌ترین محصولات برای کشت در منطقه به ترتیب ذرت با ۳۹ درصد اولویت اول، جو با ۲۳ درصد، سیب‌زمینی با ۲۰ درصد، گوجه‌فرنگی با هفت درصد و گندم با یک درصد در اولویت‌های بعدی و بهینه کشت در ایستگاه‌ها معرفی گردیدند. نامطلوب‌ترین محصول برای کشت در استان‌های کشور نیز به ترتیب توتون، پنبه، لوبیا، برنج، چغندر قند و یونجه شناخته شدند.

واژه‌های کلیدی: اقلیم بندی، الگوی کشت، تاپسیس، UNESCO, WF.

### مقدمه

الگوی کشت به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای طراحی شبکه‌های آبیاری مطرح می‌باشد که ارتباط این الگو در مراحل اولیه طراحی با توجه به شرایط زمانی و مکانی با در نظر گرفتن سیاست‌های کلان در بخش کشاورزی پیشنهاد گردیده و مبنای طراحی ساختار فیزیکی شبکه آبیاری قرار می‌گیرد. تعیین الگو بهینه کشت یک منطقه می‌تواند بر اساس اهداف مختلفی صورت گیرد. برای تعیین الگو کشت بهینه هر منطقه، باید اهداف خرد و کلان منطقه‌ای و یا مجموعه‌ای از عوامل مؤثر و محدودیت‌های موجود در انتخاب را که از نوع متغیرهای کمی و کیفی گسسته می‌باشند، مورد توجه قرار داد. یکی از عوامل مهم و محدودیت‌کننده توسعه شبکه‌های آبیاری و تولید نهاده‌های کشاورزی، محدودیت منابع آبی است. در نگرش جدید جهانی، آب کالایی اقتصادی-اجتماعی و

به‌عنوان نیاز اولیه انسان محسوب می‌شود. هرچند آب یکی از منابع تجدیدشونده به شمار می‌رود، اما مقدار آن محدود است و با توجه به رشد جمعیت، گسترش صنعت، بالا رفتن سطح بهداشت عمومی، سرانه منابع تجدیدشونده رو به کاهش می‌باشد و آب به‌عنوان یک منبع کم یاب به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک تلقی می‌شود (Aligholinia et al., 2015). مشکلات کم‌آبی در مناطق دچار بحران تنها یک مسئله ملی برای این کشورها نیست بلکه یک موضوع جهانی است که اثرات ناشی از آن در درازمدت می‌تواند کشورها را دچار چالش کند. با این مشکلات، یکی از اهداف بلندمدت مدیریت راهبردی آب کشورها، تعادل برقرار کردن بین عرضه و تقاضای آب و منابع آب موجود با کمترین هزینه ممکن می‌باشد. برای پاسخگویی به نیاز روزافزون تقاضای آب، می‌توان به توسعه منابع آبی جدید شامل بهره‌برداری بهینه از منابع آبی باقیمانده، استفاده مجدد از فاضلاب، شیرین کردن آب‌های شور و افزایش ظرفیت تولید منابع

کمترین ردپای آب (در حدود ۵۰۰ مترمکعب در سال به‌ازاء هر نفر) برای کشورهای چین، هند و اندونزی برآورد شده است. ردپای آب ایران، به‌ازاء هر نفر ۱۴۵۷ مترمکعب در سال، خودکفایی آبی کشور ۹۳/۶٪ و وابستگی به منابع آب خارجی ۶/۴٪ محاسبه شده است (Hoekstra and Houg, 2005). در پژوهشی دیگر نیز محمدخانی، ردپای آب آبی، سبز و خاکستری برخی از محصولات منتخب را در مرحله تولید و مصرف موردبررسی قرار داده است. در این مطالعه مشخص شد که در ایران تولید یک تن از محصولات (دامی و زراعی) بیش‌تر بر پایه مصرف آب آبی استوار است اما درحالی‌که به‌طور متوسط در ۱۷۶ کشور جهان، ردپای آب سبز سهم عمده را در تولید یک تن از محصولات فوق دارند (Mohammad Khani et al., 2015).

تحقیقات فوق‌ترتیب بررسی و ارائه راهکارهای مدیریتی با محوریت ردپای آب هر محصول در هر اقلیم را نشان می‌دهد. در همین راستا ژائو و همکاران، در پژوهشی تأثیرات اقدامات مدیریت مختلف کشاورزی را در مقوله‌های مختلف از جمله راندمان آبیاری، بهره‌وری مصرف آب و ردپای آب آبی و سبز را برای محصول گندم زمستانه موردبررسی قرار دادند. در این مطالعه ۲۴ مدل در اثر ترکیب چهار روش آبیاری، دو استراتژی آبیاری و سه نوع مالچ به وجود آمد. نتایج نشان داد که کم‌آبیاری بیش‌ترین تأثیر را در افزایش راندمان مصرف آب آبی داشته است، بدین ترتیب که راندمان آبیاری پنج درصد افزایش و ردپای آب آبی ۳۸ درصد کاهش یافته است. البته این موضوع در حالی است که عملکرد محصول با نه درصد کاهش روبرو بوده است (Zhuo and Hoekstra, 2017).

بررسی تحقیقات فوق بیانگر نگرانی‌های بسیار جدی متخصصین منابع آب از افزایش تقاضای آب در بخش کشاورزی و اعمال تنش‌های روزافزون به منابع آب شیرین در نقاط مختلف دنیا به دلیل بالا رفتن تقاضای محصولات کشاورزی در اقلیم‌های مختلف بوده و ضرورت نگرش نو و استفاده از معیار یا شاخص جامع کارآمدتری مانند ردپای آب را برای تعیین مقدار واقعی آب مصرفی محصولات کشاورزی جهت برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه و پایدار مصرف آب در بخش کشاورزی را بیان می‌کند. لذا هدف از این مطالعه در ابتدا بیان نمودن مقدار ردپای آب محصولات در سه بخش ردپای آب آبی، سبز و خاکستری بوده و سپس انتخاب بهترین محصول با توجه به شرایط آب و هوایی و منابع آبی در هر اقلیم و با بهینه‌سازی الگوی کشت بر مبنای ردپای آب هر محصول و ترکیب آن با شاخص جدید ردپای آب آبی واقعی (WFA<sub>blue</sub>) و شاخص RIS می‌باشد که حتی کمتر در سطح ملی به این مقوله پرداخته شده است.

موجود، در نظر گرفتن راهبردهای صرفه‌جویی آب در بخش‌های مختلف اقتصادی و توسعه روش‌های مدیریت کارآمد جدید اشاره کرد (Tajrishi and Abrishamchi, 2004).

بیش از دو دهه است که جهان پی برده که در مدیریت منابع آب باید بیشتر به مدیریت تقاضا تا مدیریت عرضه توجه کرد. بدین ترتیب دانشمندان مدیریت تلفیقی آب را مطرح نمودند. مبنای مدیریت تلفیقی بر پایه ترکیب‌پذیری مدیریت تأمین با مدیریت تقاضا استوار بوده که جنبه‌های زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی را در نظر می‌گیرد (Yevjevich, 1995). تجارت و مبادله آب مجازی و ارزیابی ردپای آب یکی از راهکارهایی است که با مدیریت تلفیقی و کارآمد در جهت توسعه پایدار بین عرضه و تقاضای آب از طریق مبادلات محصولات آب بر به‌منظور کاهش تنش آبی در دنیا مطرح می‌باشد. کشورهای کم‌آب می‌توانند با دخالت دادن تجارت آب مجازی در سیاست‌های آبی علاوه بر اینکه میزان دسترسی خود را به منابع آبی جهان افزایش دهند، از افزایش فشار بر منابع محدود خود نیز بکاهند (Aligholinia et al., 2019). اگرچه این راه‌حل موجب وابستگی کشورها شده و از خودکفایی آن‌ها می‌کاهد، اما ضرورت تخصیص بهینه منابع محدود به‌ویژه منابع آب به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل در تولید محصولات کاملاً احساس می‌شود که لازمه آن ارائه الگوی کشت مدیریتی مناسب بر اساس آب مجازی و شاخص ردپای آب محصولات مختلف کشاورزی در اقلیم‌های مختلف می‌باشد.

از سال ۲۰۰۲ میلادی که شاخص ردپای آب مطرح شد، تاکنون مطالعات فراوانی برای ارزیابی این شاخص در حوزه‌های مختلف انجام شده است. در ابتدا اکثر مطالعات برای تخمین هر سه جزء ردپای آب (ردپای آب آبی، سبز و خاکستری) در مقیاس کل جهان صورت می‌گرفت ولی سپس با توجه به اهمیت روزافزون مدیریت منابع آب در مقیاس کوچک‌تر، ارزیابی این شاخص به صورت محلی دارای اهمیت شد (Lovarelli et al., 2017) و محققان بسیاری میزان آب واقعی محصولات مختلف نظیر گندم (Jefferies et al., 2007)، چای (Hoekstra and Chapagain, 2012)، برنج (Chico et al., 2012)، انگور (Ene et al., 2013)، ذرت (Nana et al., 2013) و سیب‌زمینی (Herath et al., 2014 and Rodriguez et al., 2015) را موردبررسی قرار داده‌اند.

در سطح جهانی نیز هواکسترا و هانگ، ردپای آب کشورهای مختلف از جمله ایران را برای دوره (۱۹۹۵-۱۹۹۹) برآورد نمودند. مطابق تحقیقات آن‌ها، بیشترین ردپای آب (حدود ۲۰۰۰ مترمکعب در سال به‌ازاء هر نفر) برای کشورهای بلژیک و هلند و

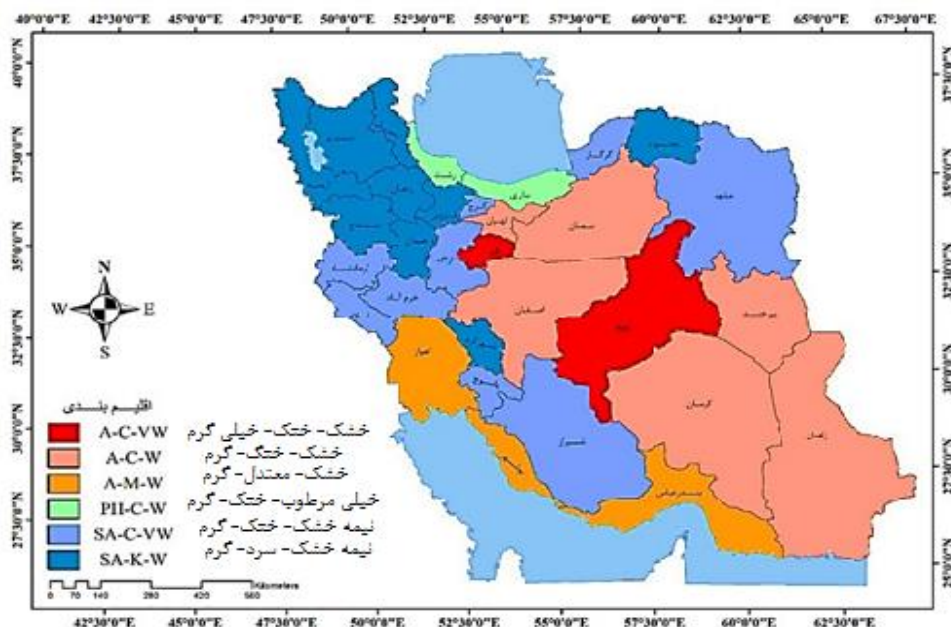
## مواد و روش‌ها

در این تحقیق از مدل بهینه‌سازی تاپسیس جهت انتخاب الگوی کشت بهینه ۱۱ محصول زراعی در شش اقلیم مختلف ایران (تقسیم‌بندی بر اساس اقلیم بندی یونسکو) (شکل ۱) استفاده گردید. روش یونسکو یکی از روش‌های مورد استفاده در پهنه‌بندی اقلیمی است که پارامترهای اصلی مورد استفاده در آن رژیم رطوبتی، تیپ زمستان و تابستان می‌باشد (UNESCO, 1979). رژیم رطوبتی نه تنها میزان آب قابل دسترس (بارندگی)، بلکه تقاضا برای آب (تبخیر-تعرق) را نیز مدنظر قرار می‌دهد که در مقایسه با سایر روش‌ها (برای مثال: دومارتن، گوسن و غیره) از یک امتیاز ویژه برخوردار است. تیپ زمستانه و تابستانه نیز به ترتیب بر

اساس میانگین دمای سردترین و گرم‌ترین ماه‌های سال تعیین می‌گردند.

انتخاب محصولات زراعی مورد مطالعه برای محاسبه ردپای آب در هر اقلیم بر اساس سطح زیر کشت، طول دوره رشد و نیاز آبی متفاوت و داده‌های در دسترس انجام پذیرفته و شامل محصولات زراعی گندم، جو، برنج، لوبیا، پنبه، توتون، چغندر قند، گوجه‌فرنگی، سیب‌زمینی، یونجه و ذرت علوفه‌ای می‌باشد.

ردپای آب محصولات نیز در سه جزء آب آبی، سبز و خاکستری محاسبه شده و در نهایت با محاسبه نیاز آبیاری و شاخص RIS به‌عنوان شاخصی که کم‌آبایی و بیش‌آبایی را برای محصولات نشان می‌دهد، نسبت به بهینه‌سازی الگوی کشت این محصولات در اقلیم‌های مختلف ایران اقدام گردید.



شکل ۱- تقسیم‌بندی اقلیمی استان‌های ایران از نظر اقلیم‌بندی یونسکو (Zare Abyaneh et al., 2010)

## محاسبات ردپای آب

ردپای آب هر محصول از حاصل جمع سه جزء آب آبی، آب سبز و آب خاکستری به دست می‌آید (رابطه ۱).

$$WF_i = WF_{i\text{green}} + WF_{i\text{blue}} + WF_{i\text{grey}} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن  $WF_i$ ، ردپای آب کل محصول  $i$  می‌باشد.  $WF_{i\text{blue}}$  ردپای آب آبی است که برای آب‌های مورد استفاده از منابع سطحی و زیرزمینی محاسبه می‌گردد.  $WF_{i\text{green}}$ ، ردپای آب سبز می‌باشد که شامل حجمی از آب باران است که به صورت رطوبت در خاک ذخیره می‌شود.  $WF_{i\text{grey}}$  نیز به‌عنوان آب خاکستری تعریف می‌شود و به حجم آبی اطلاق می‌شود که برای رقیق‌سازی کودهای کشاورزی هدررفته با استفاده رواناب یا نفوذ عمقی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Gorgin paveh et al., 2016). در رابطه

(۱) ردپای آب به‌عنوان واحدی از محصول بیان می‌شود، یعنی حجم آب در جرم محصول که معمولاً برای بیان روند ردپای آب در بخش کشاورزی از عنوان  $m^3/ton$  استفاده می‌شود. برای این منظور از حاصل تقسیم شدت ردپای آب هر محصول بر مقدار عملکرد آن استفاده می‌گردد (رابطه ۲).

$$WF = WF_i / Y \quad (\text{رابطه ۲})$$

ردپای آب هر جز نیز طبق روابط (۳) تا (۵) به دست می‌آید.

$$WF_{i\text{green}} = \frac{CWU_{i\text{green}}}{Y} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$WF_{i\text{blue}} = \frac{CWU_{i\text{blue}}}{Y} \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$WF_{i\text{grey}} = \frac{(\alpha * AR) / (C_{\text{max}} - C_{\text{nat}})}{Y} \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در روابط (۳) و (۴) به ترتیب  $CWU_{i\text{green}}$  و  $CWU_{i\text{blue}}$

مفاهیم و توضیحات ذکر شده، به منظور محاسبه جزء آبی واقعی مورد استفاده در تولید محصولات رابطه (۸) را به صورت زیر ارائه دادند.

$$CWA_{blue} = WAg + \sum_{i=1}^n WAI \quad (\text{رابطه } ۸)$$

در رابطه (۸)،  $WAg$  مقدار آب مستقیم مصرفی (بر اساس نیاز آبی) و  $WAI$  مقدار آبی است که به صورت غیرمستقیم (آبشویی، راندمان کاربرد پایین، جلوگیری از سرمازدگی و ...) بر حسب ( $m^3/ha$ ) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

به منظور محاسبه تبخیر-تعرق روزانه نیز از رابطه فائو پنمن مانیتیت بر اساس داده‌های ۳۱ ایستگاه هواشناسی در مراکز استان‌ها در قالب ۶ اقلیم مورد بررسی مطابق رابطه (۹) استفاده گردید (Allen et al., 1998).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (\text{رابطه } ۹)$$

که در آن،  $ET_0$ : تبخیر-تعرق مرجع ( $mm/day$ )،  $R_n$ : تابش خالص ورودی به سطح گیاه ( $MJ m^{-2} day^{-1}$ )،  $G$ : شار گرمای خاک ( $MJ m^{-2} day^{-1}$ )،  $T$ : میانگین روزانه دمای هوا ( $^{\circ}C$ )،  $U_2$ : میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دو متری ( $m/sec$ )،  $e_a$ : فشار بخار اشباع ( $KPa$ )،  $e_d$ : فشار بخار واقعی ( $KPa$ )،  $e_a - e_d$ : کمبود فشار بخار اشباع ( $KPa$ )،  $\Delta$ : شیب منحنی فشار بخار اشباع ( $KPa/^{\circ}C$ )،  $\gamma$ : ضریب ثابت سایکرومتری ( $KPa/^{\circ}C$ )،  $900$ : ضریب برای گیاه مرجع ( $Kg^{\circ}K / KJ/day$ ) و  $0.34$ : ضریب باد برای گیاه مرجع ( $sec/m$ ).

پس از محاسبه تبخیر-تعرق، نیاز آبی محصول با استفاده از تبخیر-تعرق، ضریب گیاهی و بارندگی مؤثر برآورد می‌گردد. برای این منظور از نرم‌افزار Crop-Wat استفاده گردید. معادله برآورد نیاز آبی محصول نیز به صورت رابطه (۱۰) می‌باشد.

$$Irr Req = \sum_{d=1}^{lgp} ((ET_0 * Kc) - Eff Rain) \quad (\text{رابطه } ۱۰)$$

که در رابطه فوق،  $Irr Req$  نیاز آبیاری خالص بر حسب  $mm/periods$  بوده و  $Kc$  ضریب گیاهی است که مقدار آن بر اساس خصوصیات محصول، تاریخ کشت، رشد محصول، طول فصل رشد و شرایط اقلیمی تغییر می‌کند (Doorenbos and Kassam, 1979).  $Eff Rain$  نیز بارندگی مؤثر بوده که برای محاسبه آن از روش USDA استفاده گردید. این روش به صورت پیش‌فرض در نرم‌افزار Crop-Wat برای محاسبه بارندگی مؤثر مدنظر قرار گرفته شده است و مطابق پیشنهاد هواکسترا و چپاگین از این روش در محاسبات رد پای آب استفاده شده است (Hoekstra and Chapagain, 2007). از طرفی ادنان و خان در پژوهشی روش USDA را برای اقلیم ایران که دارای شدت بارندگی‌های کمتری هستند پیشنهاد داده‌اند (Adnan and

جز آب سبز و جز آب آبی محصول بر حسب ( $m^3/ha$ ) و  $Y$  عملکرد گیاهان زراعی بر حسب ( $ton/ha$ ) می‌باشد. مقدار جز خاکستری رد پای آب ( $WF_{proc.grey}$ ) نیز توسط مقدار مصرف کود در هر هکتار از زمین زراعی ( $AR$ ) بر حسب ( $kg/ha$ )، درصد تلفات کود ( $\alpha$ ) بر حسب (%) و غلظت بحرانی کود ( $C_{max}$ ) بر حسب ( $m^3/ha$ ) و غلظت واقعی کود در منابع آب ( $C_{nat}$ ) بر حسب ( $m^3/ha$ ) و در نهایت عملکرد محصول ( $Y$ ) بر حسب ( $ton/ha$ )، به صورت رابطه (۵) محاسبه می‌شود (گرگین پاوه و همکاران، ۱۳۹۵). مقادیر  $\alpha$  در شرایط فاریاب و دیم به ترتیب پنج و ۱۰ درصد در نظر گرفته شد (چپاگین و همکاران، ۲۰۰۶). غلظت بحرانی کود در منابع آب دریافت‌کننده نیز بر اساس استاندارد US-EPA برابر ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر (برای کود نیتروژن) منظور شد. از آنجایی که اطلاعات دقیقی از غلظت واقعی کود در منابع آب دریافت‌کننده در دست نیست، این مقدار صفر (فرض معمول) در نظر گرفته شد (چپاگین و همکاران، ۲۰۰۶). همان‌طور که ذکر شد جزء آب خاکستری حجم آبی است که طی فرآیند تولید محصول آلوده شده و کیفیت اولیه خود را از دست می‌دهد ولی می‌توان این آب را در مناطق خشک که در آن ارزش آب بسیار بالاست دوباره با انجام عمل تصفیه مورد استفاده قرارداد. اجزا مصرف آب محصول ( $CWU$ ) سبز و آبی نیز از مجموع تبخیر-تعرق روزانه در تمام دوره رشد یک گیاه به صورت رابطه (۶) و (۷) محاسبه می‌گردند.

$$CWU_{green} = 10 * \sum_{d=1}^{lgp} ET_{green} \quad (\text{رابطه } ۶)$$

$$CWU_{blue} = 10 * \sum_{d=1}^{lgp} ET_{blue} \quad (\text{رابطه } ۷)$$

که در آن  $ET_{green}$  نشان‌دهنده تبخیر-تعرق آب سبز (تبخیر-تعرق ناشی از آب باران مورد استفاده گیاه) و  $ET_{blue}$  نشان‌دهنده تبخیر-تعرق آب آبی (تبخیر-تعرق ناشی از آب آبیاری مورد استفاده گیاه) بر حسب ( $mm/year$ ) می‌باشند. عدد ۱۰ نیز به منظور تبدیل عمق آب در میلی‌متر به حجم آب در سطح زمین  $m^3/ha$  است. در فرمول‌های (۶) و (۷)،  $lgp$  طول دوره رشد در واحد روز است. بدین ترتیب منظور از مجموع داده‌های تبخیر-تعرق در طول دوره رشد یعنی محاسبه مجموع تبخیر-تعرق روزانه گیاه از روز اول کاشت گیاه تا روز برداشت آن می‌باشد. جزء آبی مورد استفاده گیاه ( $CWU_{blue}$ ) که از رابطه (۷) به دست می‌آید، مقدار آبی که به صورت مستقیم (نیاز آبی گیاه) از طریق آبیاری مورد استفاده گیاه است را نشان می‌دهد. این در حالی است که هنگام آبیاری، مقداری آب نیز به صورت غیرمستقیم مورد مصرف قرار می‌گیرد که این مصارف غیرمستقیم شامل آبشویی خاک، آبیاری‌هایی که به دلیل جلوگیری از سرمازدگی و بیش‌آبیاری‌هایی که به دلیل راندمان پایین آبیاری مصرف می‌شود، را شامل می‌گردد (Morillo et al., 2015). با توجه به

## ارتباط ردپای آب محصولات با شاخص تأمین نسبی آب آبیاری در مدیریت آبیاری

به منظور ارزیابی آب مصرفی گیاه از مجموع مصارف مستقیم و غیرمستقیم آن، محاسبه شاخص‌های WFAblue و WFC کافی است. با این حال شاخص‌های مذکور نمی‌توانند اطلاعاتی در مورد مدیریت آبیاری، کمبود آبیاری، بیش‌آبیاری و یا آب موردنیاز محصول در حین فرآیند رشد را در اختیار بگذارند. بنابراین به منظور ارزیابی هرچه بهتر آب مصرفی در بخش کشاورزی، لازم است که شاخص ردپای آب با شاخص‌های کارا تر در مدیریت آبیاری ترکیب شده و مورد استفاده و تجزیه و تحلیل قرار گیرد. با ترکیب شاخص ردپای آب با شاخص RIS می‌توان به ارزیابی ارتباط عملکرد گیاه با آب مصرفی آن و مدیریت آبیاری پرداخت. بدین ترتیب که CWAbblue اطلاعات مربوط به مقدار آب مورد استفاده گیاه را در اختیار می‌گذارد در حالی که شاخص RIS مقدار کفایت آبیاری را در مقابل نیاز آبیاری نظری گیاه نشان می‌دهد. بنابراین هرچه گیاه ردپای آب کمتری در مقابل شاخص RIS داشته باشد، دارای عملکرد بیشتری نسبت به آب مصرفی بوده و بهینه‌ترین حالت به منظور کشت در منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

### مدل بهینه‌سازی چند معیاره تاپسیس

مدل بهینه‌سازی تاپسیس برای اولین بار توسط هوانگ و یون ارائه شد (Hwang and Yoon, 1981). تنها داده ذهنی موردنیاز روش تاپسیس، اهمیت اوزان معیارهاست که این امر موجب جذابیت این روش برای تصمیم‌گیرندگان شده است (Olson, 2004). مفهوم تاپسیس، بیان‌کننده این مطلب است که ایده‌آل‌ترین گزینه تنها گزینه‌ای نیست که کوتاه‌ترین فاصله را از راه‌حل ایده‌آل مثبت دارد، بلکه بیشترین فاصله را از راه‌حل ایده‌آل منفی نیز داراست (Deng et al., 2000).

بنابراین مفهوم تاپسیس، نیازمند تعیین یک نقطه ایده‌آل است. تعیین نقطه ایده‌آل معمولاً گام اول برای حل مسائل بهینه‌سازی است. روش معیار جهانی، برنامه‌ریزی آرمانی، برنامه‌ریزی فازی و رویکردهای تعاملی همگی به منظور دستیابی به راه‌حلی نسبتاً بهینه به نقاط ایده‌آل، می‌توان مسائل بهینه‌سازی را از راه جایابی گزینه‌ها یا تصمیمات حل کرد، مبنی بر اینکه کدام یک به نقطه ایده‌آل نزدیک تر است.

تاوانا و ماربینی در تشریح گام‌های روش حل تاپسیس بیان می‌دارند که در قدم اول یک ماتریس تصمیم‌گیری برای n گزینه و m معیار بنا می‌شود (Tavana and Marbini, 2011). این ماتریس مقدار هر گزینه را بر اساس هر معیار به صورت  $X_{ij}$  نشان

(Khan, 2009). روش پیشنهادی USDA برای محاسبه بارندگی مؤثر به صورت رابطه (۱۱) می‌باشد.

(رابطه ۱۱)

$$\text{Eff Rain} = \begin{cases} \frac{\text{Ptot}(125-0.2 \text{ Ptot})}{125} & , \text{ Ptot} \leq 250 \text{ mm} \\ 125 + 0.1 \text{ Ptot} & , \text{ other wise} \end{cases}$$

که در آن، Ptot کل بارندگی و Eff Rain بارندگی مؤثر بر حسب میلی‌متر می‌باشند.

در نهایت تبخیر-تعرق آب سبز و آبی نیز با توجه به نیاز آبیاری، تبخیر-تعرق گیاهی و بارندگی مؤثر به ترتیب طبق روابط (۱۲) و (۱۳) محاسبه می‌گردند:

(رابطه ۱۲)

$$\text{ET green} = \begin{cases} \text{ETc} & , \text{ Irr Req} = 0 \\ \text{Eff Rain} & , \text{ other wise} \end{cases}$$

(رابطه ۱۳)

$$\text{ET blue} = \begin{cases} 0 & , \text{ Eff Rain} \geq \text{ETc} \\ \text{ETc} - \text{Eff Rain} & , \text{ other wise} \end{cases}$$

### شاخص تأمین نسبی آب آبیاری (RIS)

شاخص تأمین نسبی آب آبیاری (RIS) مفهومی است که به منظور ارزیابی مدیریت آبیاری استفاده می‌گردد و نشان‌دهنده وضعیت آبیاری (تأمین آب) در مقابل نیاز آبی گیاه می‌باشد. این شاخص توسط موسسه بین‌المللی فناوری و پژوهش در آبیاری و زهکشی (IPTRID)<sup>۲</sup> معرفی گردید و به عنوان یک ابزار قدرتمند در ارزیابی مدیریت آبیاری در نقاط مختلف دنیا و در مناطق فاریاب و اراضی کشاورزی مورد استفاده قرار گرفته است (Malano and burton, 2001; Rodrigues et al., 2012; Geng et al., 2014). مقدار این شاخص از رابطه (۱۴) به دست می‌آید.

$$\text{RIS} = \frac{\text{WAg}}{10 * (\text{ETc} - \text{Pe})} \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

در رابطه ۱۴، WAg ( $\text{m}^3/\text{ha}$ ): حجم آب آبیاری است که در مزرعه برای تولید محصول مورد استفاده قرار می‌گیرد. Pe و ETc به ترتیب مقادیر مربوط به تبخیر-تعرق و بارندگی مؤثر حسب (mm/year) می‌باشند. عدد ۱۰ نیز به منظور تبدیل عمق آب از میلی‌متر به حجم آب در سطح واحد  $\text{m}^3/\text{ha}$  است. بر اساس رابطه فوق، در آبیاری کامل (تأمین آب موردنیاز گیاه)، صورت و مخرج رابطه باهم برابر بوده و عدد یک برای شاخص RIS به دست می‌آید. این در حالی است که در عمل اغلب مقدار شاخص RIS دقیقاً برابر یک نبوده و مقادیر مربوط به آن بیشتر و یا کمتر از یک به دست می‌آید. هرچه مقدار شاخص RIS از یک بیشتر باشد، نشان‌دهنده آبیاری بی‌رویه و هرچه این نسبت کمتر از یک باشد نشان‌دهنده کم‌آبیاری می‌باشد.

معیارهای مثبت یا بیشترین مقدار آن گزینه در معیارهای منفی در ماتریس بی مقیاس وزین می‌باشد.

(رابطه ۲۱)

$$A^+ = \left\{ \left( \max_i v_{ij} \mid j \in B \right), \left( \min_i v_{ij} \mid j \in C \right) \mid i = 1, 2, \dots, n \right\} = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_j^+, \dots, v_n^+\}$$

B عبارت است از مجموعه معیارها با بار معنایی مثبت و C مجموعه معیارها با بار معنایی منفی است.

برای محاسبه فاصله گزینه نام با گزینه ایده‌آل مثبت ( $S_i^+$ ) و گزینه ایده‌آل منفی ( $S_i^-$ ) از روش اقلیدسی استفاده می‌شود.

(رابطه ۲۲)

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}; \quad i = 1, 2, \dots, n$$

(رابطه ۲۳)

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}; \quad i = 1, 2, \dots, n$$

در انتها نزدیکی نسبی گزینه نام با راه‌حل ایده‌آل، از تقسیم فاصله آن گزینه از گزینه ایده‌آل منفی و گزینه ایده‌آل مثبت حاصل می‌شود.

(رابطه ۲۴)

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{(S_i^+ + S_i^-)}; \quad 0 \leq T_i \leq 1; \quad i = 1, 2, \dots, n$$

بهترین گزینه آن است که شاخص  $C_i^*$  آن بیشتر باشد. از این رو بر اساس این شاخص، رتبه‌بندی گزینه‌ها انجام می‌شود.

در این تحقیق، مجموعه عوامل مختلف مؤثر بر انتخاب الگوی کشت بهینه در پنج گروه، ردپای آب کل، نسبت ردپای آب سبز به آب آبی، ردپای آب خاکستری، نیاز آبیاری و شاخص RIS تقسیم‌بندی گردید. ساختار تحلیل مدل تاپسیس دارای سه سطح بوده که عبارت‌اند از، سطح هدف که انتخاب الگوی کشت بهینه می‌باشد، سطح عوامل مؤثر بر انتخاب نوع محصول یا سطح معیارها و نهایتاً سطح گزینه‌های انتخابی (محصولات کشت) که شامل محصولات استراتژیک و الگوی کشت منطقه می‌باشند (شکل ۲).

می‌دهد.

$$X_{n \times m} = \begin{bmatrix} X_{11} & \dots & X_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{n1} & \dots & X_{nm} \end{bmatrix} \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

در گام بعدی اوزان اهمیت برای هر معیار توسط DM مشخص می‌شود به طوری که:

$$DM = \sum_{j=1}^m W_j = 1, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

سپس برای بی‌بعد سازی ماتریس تصمیم‌گیری، از تقسیم هر عنصر ماتریس تصمیم‌گیری ( $X_{ij}$ ) بر مجذور مجموع مربعات مقادیر در هر ستون استفاده می‌شود.

$$r_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n X_{ij}^2}} \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

$X_{ij}$  اندازه مقدار گزینه  $i$  بر اساس شاخص  $z$  و مقدار بی مقیاس شده آن در ماتریس تصمیم‌گیری است. ماتریس (۱۸)، ماتریس بی مقیاس شده مسئله می‌باشد.

$$R_{n \times m} = \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (\text{رابطه ۱۸})$$

در گام بعدی، اوزان معین شده به وسیله DM برای هر معیار، از راه ضرب در ماتریس بی مقیاس شده و ماتریس بی مقیاس وزین حاصل می‌شود. بنابراین،  $V_{ij}$  مقدار وزین بی مقیاس شده گزینه  $i$  برای معیار  $j$  است.

(رابطه ۱۹)

$$V = W_{n \times m} \cdot R_{n \times m} = \begin{bmatrix} V_{11} & \dots & V_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ V_{n1} & \dots & V_{nm} \end{bmatrix}; \quad W_{n \times n} =$$

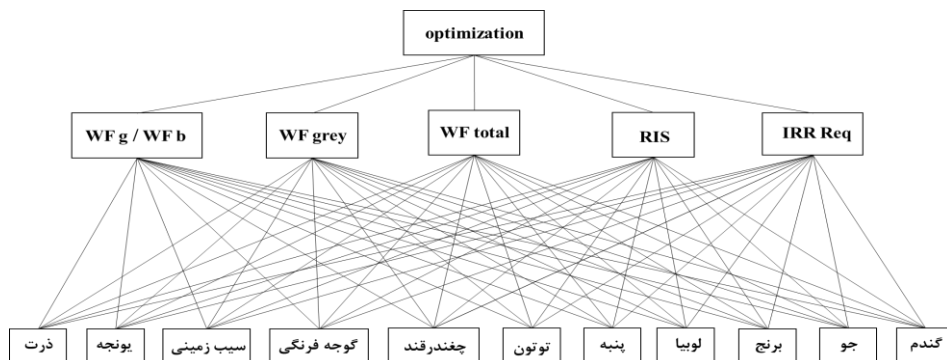
$$\{W_1, W_2, \dots, W_n\}$$

در نهایت باید به محاسبه گزینه ایده‌آل مثبت و گزینه ایده‌آل منفی رسید. گزینه ایده‌آل مثبت بیشترین مقدار یک گزینه در معیارهای مثبت یا کمترین مقدار آن گزینه در معیارهای منفی در ماتریس بی مقیاس وزین خواهد بود.

(رابطه ۲۰)

$$A^- = \left\{ \left( \min_i v_{ij} \mid j \in B \right), \left( \max_i v_{ij} \mid j \in C \right) \mid i = 1, 2, \dots, n \right\} = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_j^-, \dots, v_n^-\}$$

گزینه ایده‌آل منفی نیز کمترین مقدار یک گزینه در



شکل ۲- معیارها و گزینه‌های انتخابی در بهینه‌سازی الگوی کشت به روش تاپسیس

## نتایج و بحث

### اجزا ردپای آب در اقلیم‌های مختلف

ردپای آب محصولات در سه جز ردپای آب آبی، سبز و خاکستری برای هر شش اقلیم مورد مطالعه در ایران مورد محاسبه قرار گرفت و نتایج در جدول (۱) نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده میزان ردپای آب محصولات در همه اقلیم‌ها بیشتر از ردپای آب سبز و خاکستری بوده و این نشان‌دهنده مصرف عمده محصولات مورد کشت در ایران از منابع آب‌های آبی می‌باشد که با توجه به اقلیم عمدتاً خشک و نیمه‌خشک کشور و همچنین رایج بودن کشاورزی فاریاب با راندمان عمدتاً پایین، طبیعی است. در بین محصولات مورد بررسی گندم، جو، یونجه، پنبه و توتون محصولاتی هستند که بیشترین مقدار ردپای آب سبز را دارند که بیشترین مقدار آن نیز در اقلیم PH-C-W (خیلی

مرطوب خنک گرم) می‌باشد که این نیز با توجه به موقعیت جغرافیایی منطقه و اقلیم حاکم در آن و وجود بارندگی‌های بیشتر در این منطقه منطقی است. این در حالی است که بیشترین مقدار ردپای آب آبی و خاکستری، عمدتاً مربوط به برنج، لوبیا، پنبه و توتون می‌باشد که به دلیل مصرف آب بالای این محصولات (نیاز آبی بالا) می‌باشد. الگوی تغییرات ردپای آب آبی و خاکستری محصولات نیز نشان‌دهنده مطابقت این دو جز از اجزای ردپای آب می‌باشد که این نیز به این دلیل است که عمده تلفات سموم و مواد شیمیایی و به تبع آن آلودگی آب‌های مصرفی در بخش کشاورزی در کشاورزی آبی و با آب آبیاری حاصل از منابع آب آبی صورت می‌گیرد. با توجه به بالا بودن حجم آب آبی و خاکستری در ردپای آب کل محصولات، الگوی ردپای آب کل نیز تحت تأثیر این دو پارامتر بوده و الگوی مشابه با ردپای آب آبی و خاکستری را در اقلیم‌های مختلف ایران نشان می‌دهد.

جدول ۱- ردپای آب محصولات در سه جز ردپای آب آبی، سبز و خاکستری در اقلیم‌های ایران (m<sup>3</sup>/ton)

اجزا ردپای آب	اقلیم	جو	گندم	یونجه	گوجه فرنگی	سیب زمینی	چغندر قند	توتون	پنبه	لوبیا	برنج	ذرت
ردپای آب سبز	SA-K-W	۶۲۹/۷	۵۹۸/۳	۲۵۱/۷	۱۸/۶	۲۴/۹	۲۰/۲	۵۱۸/۷	۳۷۷/۰	۴۶۲/۷	۱۱۳/۳	۳۰/۴
	A-M-W	۵۴۶/۳	۳۷۵/۰	۱۰۵/۴	۲۲/۵	۳۵/۳	۱۷/۶	۷۲/۷	۵۳/۰	۱۵/۶	۱۴/۱	۱۱/۸
	A-C-VW	۲۰۰/۷	۱۷۴/۲	۷۳/۸	۱۳/۱	۱۳/۸	۱۰/۹	۱۲۷/۸	۷۰/۹	۱۴۱/۵	۲۱/۸	۱۴/۵
	PH-C-W	۹۰۰/۰	۹۸۳/۰	۴۸۶/۷	۱۲۲/۷	۱۵۳/۸	۶۱/۹	۹۷۹/۳	۹۰۶/۰	۴۳۳/۹	۳۰۹/۶	۱۴۲/۷
	SA-C-VW	۶۸۲/۵	۶۶۸/۲	۲۲۳/۵	۲۵/۴	۳۸/۲	۱۹/۲	۳۷۶/۱	۳۴۱/۷	۱۶۱/۹	۶۵/۵	۳۲/۷
A-C-W	۳۱۳/۱	۲۶۶/۷	۱۰۶/۷	۱۱/۱	۱۶/۴	۹/۳	۱۷۰/۹	۸۴/۵	۱۶۴/۳	۱۹/۹	۱۴/۳	
ردپای آب آبی	SA-K-W	۷۲۸/۶	۱۱۲۳/۸	۱۲۲۹/۲	۲۷۲/۷	۳۲۲/۲	۲۷۰/۴	۵۲۹۲/۸	۵۲۷۰/۳	۳۰۲۸/۵	۲۷۴۶/۱	۴۳۰/۵
	A-M-W	۱۶۹۵/۷	۱۵۳۳/۱	۱۶۵۰/۵	۱۵۶/۷	۲۵۳/۱	۳۵۸/۵	۶۴۳۰/۵	۵۸۰۲/۷	۳۹۱۲/۱	۳۷۸۲/۲	۴۹۵/۸
	A-C-VW	۱۵۲۱/۵	۲۰۷۸/۳	۱۶۳۹/۱	۶۸۴/۹	۸۳۶/۷	۴۸۷/۰	۳۹۷۵/۶	۶۳۵۹/۰	۴۹۵۵/۷	۵۵۷۰/۶	۶۶۵/۰
	PH-C-W	۵۰۵/۴	۷۴۸/۹	۵۱۳/۶	۲۴۸/۹	۲۷۳/۸	۹۷/۴	۲۷۸۶/۳	۱۹۳۷/۰	۱۱۲۹/۸	۹۱۸/۰	۳۴۵/۵
	SA-C-VW	۵۶۲/۵	۸۴۳/۶	۱۰۸۶/۳	۲۷۷/۳	۴۳۳/۸	۳۱۱/۰	۴۱۳۱/۷	۵۱۱۸/۸	۳۷۲۵/۳	۲۸۶۸/۱	۴۹۸/۲
A-C-W	۱۸۰۳/۳	۲۵۳۶/۲	۱۴۳۵/۳	۵۱۱/۰	۴۵۶/۲	۴۳۷/۲	۵۸۵۷/۲	۴۷۵۳/۲	۴۹۱۲/۹	۳۲۰۱/۴	۴۴۳/۶	
ردپای آب خاکستری	SA-K-W	۲۳۲/۱	۲۳۵/۷	۲۲۸/۵	۱۱۴/۲	۳۷/۰	۴۵/۱	۶۸۴/۵	۳۶۱/۸	۶۰۴/۸	۲۳۵/۵	۲۴۲/۳
	A-M-W	۲۸۶/۸	۳۹۰/۴	۳۳۹/۰	۱۱۷/۰	۷۲/۰	۴۵/۶	۹۷۳/۸	۹۸۸/۶	۱۱۲۱/۹	۲۴۱/۸	۴۸۰/۳
	A-C-VW	۲۴۵/۲	۲۴۴/۲	۲۴۹/۸	۱۱۵/۶	۳۳/۴	۴۶/۱	۹۹۹/۵	۸۲۰/۲	۱۱۶۷/۹	۷۸۳/۲	۲۹۳/۷
	PH-C-W	۲۳۰/۷	۲۳۷/۹	۲۳۶/۰	۱۱۳/۰	۴۰/۴	۴۴/۹	۶۱۰/۷	۳۵۵/۲	۸۱۹/۰	۲۳۷/۹	۳۷۷/۶
	SA-C-VW	۲۴۱/۷	۳۰۸/۸	۲۶۹/۳	۱۱۵/۶	۳۹/۵	۴۵/۴	۸۰۱/۶	۳۶۳/۳	۷۶۴/۲	۲۳۴/۳	۴۱۳/۱
A-C-W	۲۶۲/۵	۳۰۶/۱	۲۹۲/۸	۱۱۵/۲	۳۸/۷	۴۵/۷	۸۱۵/۸	۳۷۵/۶	۸۶۵/۷	۵۱۳/۵	۳۷۷/۷	

\* عملکرد گیاهان بر اساس عملکرد دانه در محاسبات لحاظ شده است.

محصولات چغندر قند، پنبه، لوبیا، برنج و ذرت در مقایسه با سایر محصولات نسبت آب سبز کمتری در مقابل ردپای آب آبی دارند که این امر نشان‌دهنده مصرف عمده این محصولات از منابع آب آبی (آب‌های سطحی و زیرزمینی که مستقیماً برای آبیاری استفاده می‌شوند) می‌باشد. نتایج فوق با نتایج پژوهش علیقلی نیا و همکاران، رسولی مجد و همکاران، محمدی و همکاران و همچنین مطالعات جامع ردپای آب محصولات کشورهای مختلف که توسط گریبنزلینس و هواکسترا انجام یافته مطابقت کامل دارد

با توجه به جدول (۱) در بین محصولات مورد بررسی، بیشترین مقدار ردپای آب آبی و سبز مربوط به محصول گندم به ترتیب با مقدار (m<sup>3</sup>/ton) ۲۵۳۶/۲ در اقلیم A-C-W و (m<sup>3</sup>/ton) ۹۸۳ در اقلیم PH-C-W می‌باشد. کمترین مقدار ردپای آب آبی و سبز نیز مربوط به محصول چغندر قند به ترتیب با مقدار (m<sup>3</sup>/ton) ۹۷/۴ و (m<sup>3</sup>/ton) ۹/۳ در اقلیم A-C-W می‌باشد که این به دلیل عملکرد تولیدی بالای این محصول در بین سایر محصولات تولیدی می‌باشد. ارزیابی محصولات نشان می‌دهد که



کمتر از آن باشد و در مقابل ردپای آب محصول نیز رقم کمتری را به ازای محصول تولیدی نشان دهد، وضعیت گیاه موردنظر مطلوب‌تر و بهینه‌تر خواهد بود.

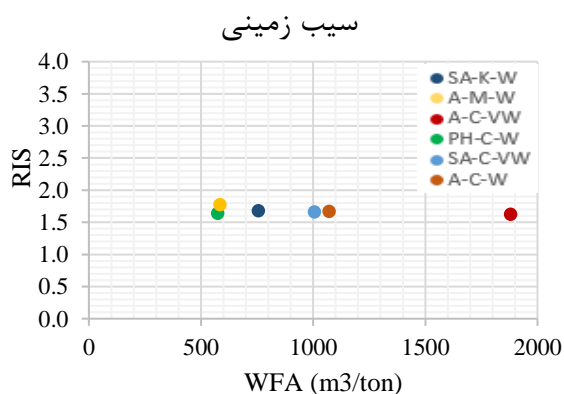
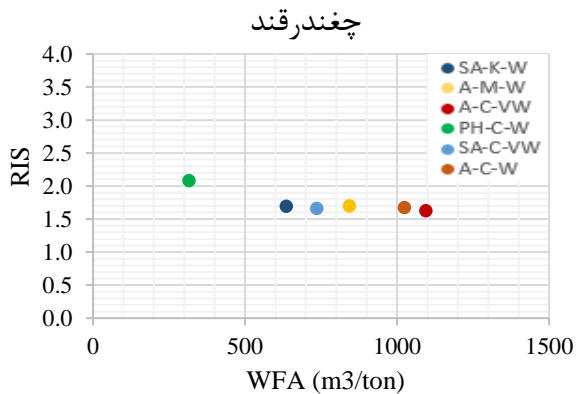
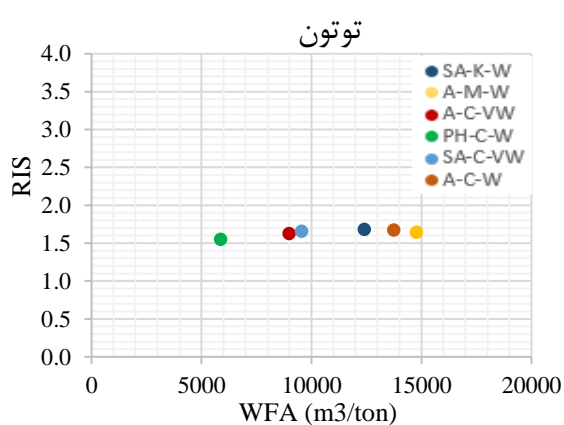
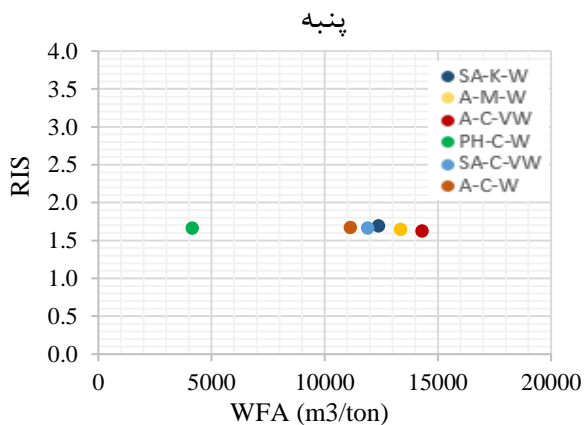
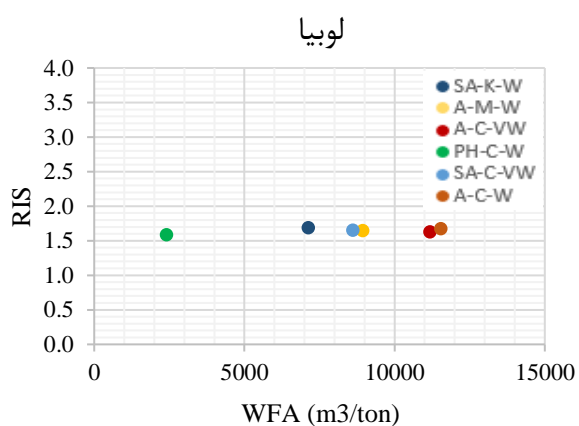
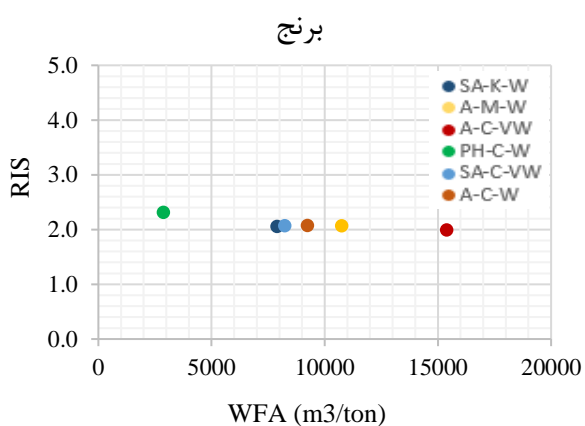
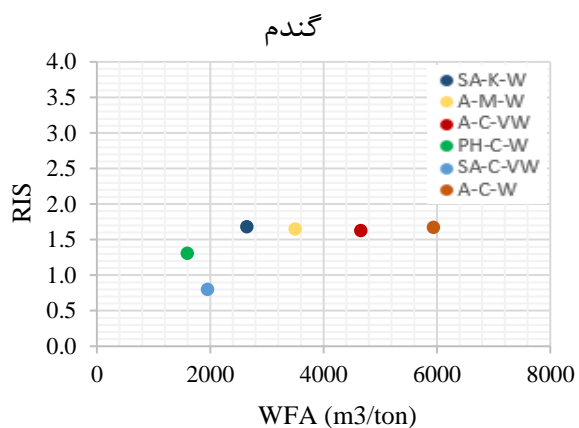
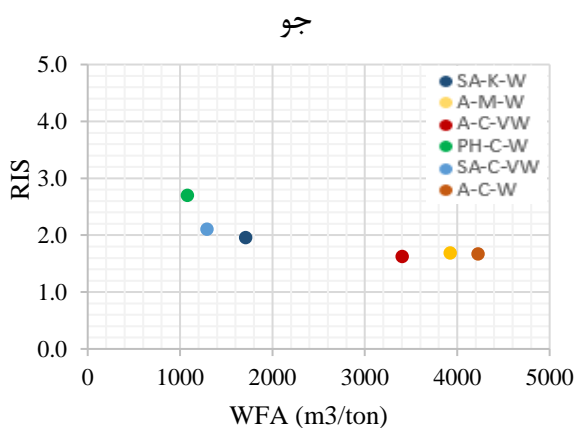
با توجه به شکل (۳) در هر شش اقلیم موردبررسی و در همه محصولات (به جز گندم) مقدار شاخص RIS بیشتر از یک بوده که این نشان‌دهنده بیش‌آبیاری برای این محصولات می‌باشد. در محصول گندم مقدار شاخص RIS کمتر از سایر محصولات بوده که این به دلیل طول دوره رشد این محصول و تاریخ کشت آن می‌باشد چراکه این محصول عمدتاً در فصل‌های بارشی (پاییز، زمستان و بهار) کشت می‌شود و کمتر از آب آبیاری برای آبیاری آن‌ها استفاده می‌گردد و همین امر باعث پایین آمدن شاخص RIS برای این محصول می‌گردد. بیشترین مقدار RIS نیز برای محصول برنج به دست آمده است که با توجه به ماهیت گیاهی این محصول و کشت غرقابی آن امری طبیعی است.

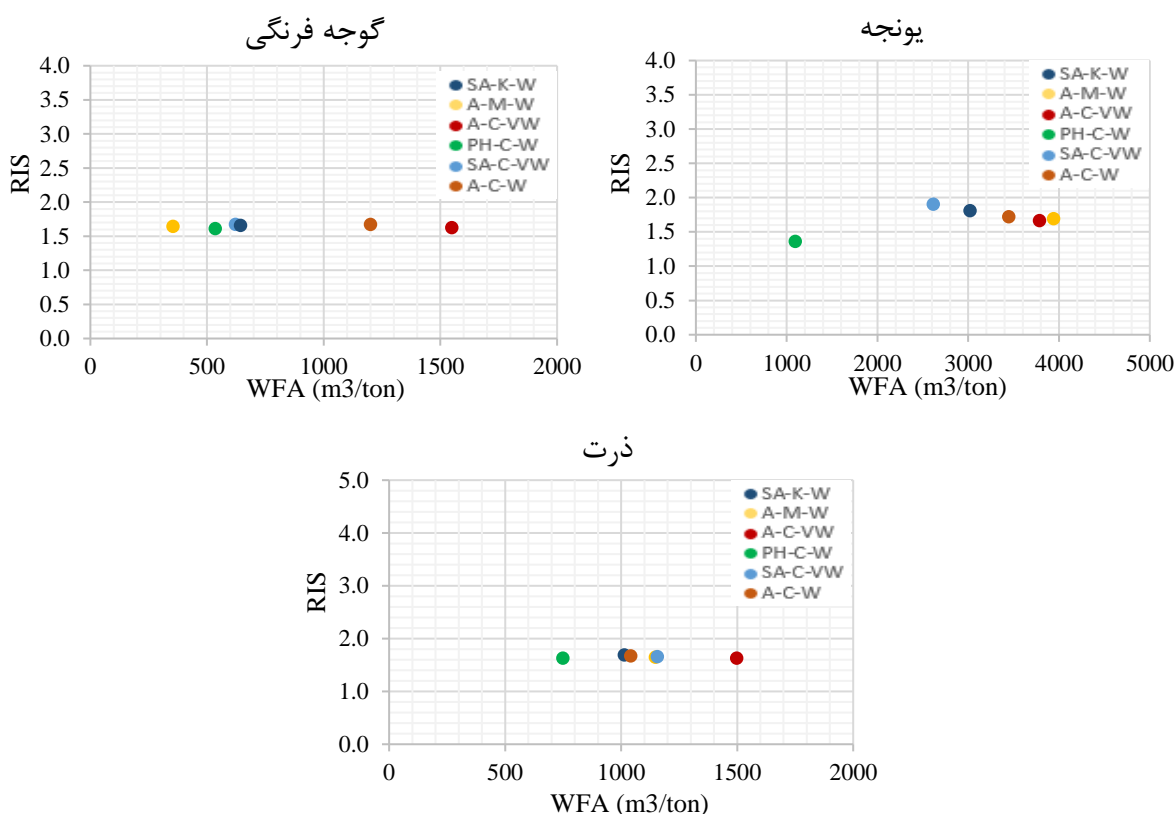
در بین اقلیم‌های موردبررسی نیز، بیشترین میزان شاخص RIS، عمدتاً در اقلیم PH-C-W (استان‌های شمالی کشور و حاشیه دریای مازندران) به دست آمده است. کمترین میزان شاخص RIS نیز در اقلیم‌های A-C-W و A-C-VW (استان‌های جنوبی و حاشیه خلیج فارس) به دست آمده است. این امر ناشی از اقلیم گرم و خشک این مناطق و کمبود آب آبیاری قابل‌دسترس در این مناطق و استفاده بهینه‌تر از آب شیرین در بخش کشاورزی این مناطق می‌باشد. این در حالی است که ارزیابی ردپای آب آبی واقعی (WFA) نتایج معکوسی را نشان می‌دهد بطوریکه بیشترین مقدار ردپای آب آبی واقعی در اقلیم‌های A-C-W و A-C-VW (استان‌های جنوبی و حاشیه خلیج فارس) محاسبه شده است و کمترین میزان ردپای آب واقعی در اقلیم PH-C-W (استان‌های شمالی کشور و حاشیه دریای مازندران) به دست آمده است. علت این امر عملکرد تولیدی محصولات در اقلیم‌های موردبررسی می‌باشد. عملکرد تولیدی محصولات در اقلیم PH-C-W و استان‌های شمالی کشور معمولاً رقم بالایی بوده که این علیرغم استفاده بیشتر محصولات از آب، باعث کاهش ردپای آب آبی واقعی در واحد تولیدی محصول شده است. در استان‌های جنوبی به دلیل دمای بالای این مناطق و کوتاه بودن طول دوره رشد گیاه، محصولات عمدتاً عملکرد پایینی دارند و این امر باعث بالا رفتن ردپای آب آبی واقعی محصولات در این مناطق می‌گردد.

(Aligholini et al., 2015; Rasouli majd et al., 2015; Mohammadi et al., 2017; Gerbens-Leenes and Hoekstra, 2012).

#### ارتباط شاخص RIS با ردپای آب (WF) در ارزیابی محصولات تولیدی از نظر آب مصرفی

در تعیین شاخص بهره‌وری از آب از تابع عملکرد استفاده می‌گردد که این تابع رابطه بین محصول قابل‌فروش در مقابل آب مصرفی را نشان می‌دهد. با توجه به تحقیقات انجام‌گرفته روی محصولات مختلف مشخص شده است که به علت تغییرات عملکرد، تابع تولید به شکل سهمی بوده است (Sepaskhah et al., 2006). به طوری که عملکرد محصول در آغاز روندی صعودی داشته که شیب آن در ابتدا شدید و سپس ملایم شده و سرانجام در یک نقطه به حداکثر مقدار خود می‌رسد و پس از آن روند نزولی ملایمی پیدا می‌کند. با افزایش آبیاری (بیش‌آبیاری) و یا کمبود آب آبیاری (کم‌آبیاری)، عملکرد محصول از مقدار نهایی خود کاهش می‌یابد. زیرا در شرایط کم‌آبیاری گیاه نمی‌تواند به طور عادی به تولید کامل خود ادامه دهد و با کاهش عملکرد جهت مقابله با خشکی روبه‌رو خواهد بود. اما با آبیاری، میزان محصول، به صورت یک تابع درجه دوم با افزایش آب، زیاد می‌شود و این روند تا مرحله‌ای که آب داده‌شده به زمین، مورد استفاده قرار گیرد و خاک از حالت ظرفیت زراعی خارج نشود، ادامه می‌یابد. با افزایش میزان رطوبت خاک، زمین به حال غرقابی درآمده و هوای موجود در خاک تخلیه می‌گردد که این ابتدا سبب کاهش عملکرد گیاه و در نهایت با ادامه وضع موجود، سبب خفگی ریشه و از بین رفتن گیاه می‌شود (Mashaal et al., 2008). بنابراین هدف اصلی باید برافزایش تولید محصول به ازای آب مصرفی و استفاده بهینه از منابع آب موجود متمرکز باشد. در این تحقیق به منظور ارزیابی وضعیت محصولات تولیدی از نظر آبیاری و آب مصرفی به ازای محصول تولیدی و عملکرد، ابتدا مقادیر ردپای آب آبی واقعی (WFA) محاسبه گردید و سپس نمودار شاخص RIS در مقابل تغییرات ردپای آب آبی واقعی (WFA) محصولات رسم گردید. شکل (۳) مقادیر شاخص RIS را در مقابل شاخص ردپای آب آبی واقعی (WFA) برای محصولات گندم، جو، برنج، لوبیا، پنبه، توتون، چغندر قند، سیب‌زمینی، گوجه‌فرنگی، یونجه و ذرت، نشان می‌دهد. در نمودار فوق هرچه مقادیر مربوط به شاخص RIS نزدیک به عدد یک و





شکل ۳- مقادیر شاخص RIS در مقابل شاخص ردپای آب آبی واقعی (WFA) برای محصولات مورد بررسی

کشت بهینه در پنج گروه، ردپای آب کل، نسبت ردپای آب سبز به آب آبی، ردپای آب خاکستری، نیاز آبیاری و شاخص RIS تقسیم‌بندی گردید.

گزینه‌های مورد بررسی نیز شامل گیاهان گندم، جو، برنج، لوبیا، پنبه، توتون، چغندر قند، سیب‌زمینی، گوجه‌فرنگی، یونجه و ذرت می‌باشد. به منظور مقایسه معیارها و ارزیابی گیاهان، گزینه‌های ایده‌آل مثبت و گزینه‌های ایده‌آل منفی تعریف گردیدند. بدین ترتیب گزینه ایده‌آل مثبت، حداکثر نسبت ردپای آب سبز به آب آبی و گزینه‌های ایده‌آل منفی، حداکثر مقدار ردپای آب کل، ردپای آب خاکستری، نیاز آبیاری و شاخص RIS برای تمامی محصولات مشخص گردید. در نهایت نزدیکی نسبی هر گزینه با راه‌حل ایده‌آل، از تقسیم فاصله آن گزینه از گزینه ایده‌آل منفی و گزینه ایده‌آل مثبت حاصل می‌شود و بدین ترتیب هر یک از گزینه‌ها با توجه به بهینه‌ترین حالت رتبه‌بندی می‌گردند.

جدول (۲)، رتبه‌بندی محصولات را بر اساس بهینه‌ترین حالت برای محصولات گندم، جو، برنج، لوبیا، پنبه، توتون، چغندر قند، سیب‌زمینی، گوجه‌فرنگی، یونجه و ذرت را در تمامی ایستگاه‌های کشور نشان می‌دهد. مطابق جدول (۲) تمامی محصولات از نظر رتبه‌بندی بین بازه عددی یک تا یازده قرار گرفته‌اند، بدین ترتیب هر چه رتبه گیاه کمتر باشد مطلوب‌تر

بنابراین در یک جمع‌بندی کلی می‌توان گفت برای دستیابی به بهینه‌ترین حالت باید همه اهداف به صورت یکپارچه و با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از عوامل مؤثر و محدودیت‌های موجود مدنظر قرار گیرد تا با الگوی مناسب و صحیح بتوان در جهت افزایش بهره‌وری محصولات و حفظ منابع ارزشمند آبی قدم مؤثری برداشت. لازمه این کار در مرحله اول تعیین الگوی کشت بهینه و سپس بررسی راهکارهای موجود جهت بازنگری در سیاست‌های کلان کشت بر اساس شرایط جغرافیایی و منطقه‌ای تحت کشت محصولات می‌باشد.

تعیین الگوی کشت بهینه بر اساس شرایط موجود در هر منطقه تعیین الگو بهینه کشت یک منطقه می‌تواند بر اساس اهداف مختلفی صورت گیرد. هدف کشاورزان، حداکثر نمودن سودآوری اقتصادی است، در حالی که سیاست کشور در اقتصاد، حداکثر نمودن سودآوری اجتماعی، بهره‌وری نهاده‌های مختلف به خصوص منابع محدود آبی و درصدد دستیابی به خودکفایی می‌باشد. اهداف فوق‌الذکر در سطوح خرد و کلان، لزوماً با یکدیگر هم‌جهت نمی‌باشند و چه‌بسا در بسیاری موارد در تضاد با یکدیگر قرار می‌گیرند. در این تحقیق از مدل بهینه‌سازی تاپسیس جهت انتخاب الگوی کشت بهینه ۱۱ محصول زراعی در تمامی استان‌های کشور استفاده گردید. مجموعه عوامل مختلف مؤثر بر انتخاب الگوی

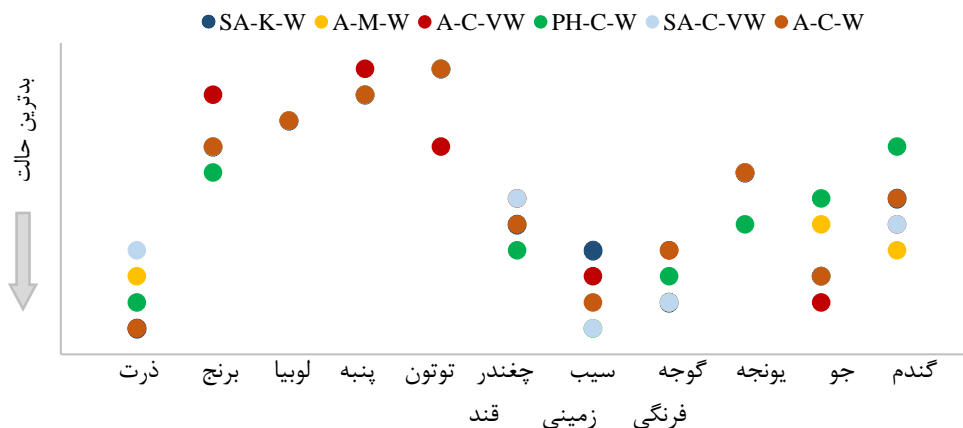
خواهد بود و هرچه رتبه گیاه بزرگ تر و به سمت عدد یازده نزدیک باشد، برای منطقه موردنظر نامطلوب تر خواهد بود.

جدول ۲- رتبه بندی محصولات بر اساس بهینه ترین حالت (عدد ۱ بهترین محصول و عدد ۱۱ نامطلوب ترین محصول)

اقليم	گندم	جو	يونه	گوجه فرنگی	سیب زمینی	چغندر قند	توتون	پنبه	لوبیا	برنج	ذرت
SA-K-W	۶	۳	۷	۲	۴	۵	۱۱	۱۰	۹	۸	۱
A-M-W	۴	۵	۷	۲	۱	۶	۱۱	۱۰	۹	۸	۳
A-C-VW	۵	۲	۷	۴	۳	۶	۸	۱۱	۹	۱۰	۱
PH-C-W	۸	۶	۵	۳	۱	۴	۱۱	۱۰	۹	۷	۲
SA-C-VW	۵	۳	۷	۲	۱	۶	۱۱	۱۰	۹	۸	۴
A-C-W	۶	۳	۷	۴	۲	۵	۱۱	۱۰	۹	۸	۱

نظر گرفته شده است و این امر در شکل (۴) به صورت همپوشانی نقاط اقلیم ها و به صورت تک نقطه نشان داده شده است. در نهایت با توجه به گستردگی پهنه مرزی کشور و تنوع اقلیمی مناطق گوناگون، رسیدن به الگوی کشت مناسبی که از آن بتوان حداکثر بهره برداری را از عوامل و نهاده های تولید به ویژه عامل محدودکننده آب به دست آورد، کاری سخت و امری دشوار به نظر می رسد. با این حال الگوی کشت پیشنهادی ممکن است در استفاده از منابع، در حداکثر کارایی اقتصادی قرار نداشته باشد اما گوناگونی الگوی کشت بهینه انتخابی می تواند نرخ خالص هر واحد از مقدار آب در دسترس را از منابع گوناگون را حداکثر نماید. که برای رسیدن به این هدف، الگوی موردنظر باید متناسب با پتانسیل های منطقه ای، عامل تولید و محدودیت های اقلیمی موجود باشد. تحقیقات مشابه انجام شده نیز نشان می دهد که مسئله الگوی کشت و انتخاب محصولی مناسب که علاوه بر همخوانی با شرایط منطقه بیشترین بازدهی را داشته باشد در بیشتر تحقیقات صرفاً با استفاده از الگوریتم های بهینه سازی صورت گرفته است و محصول منتخب در هر شرایط اقلیمی متناسب با اقلیم و جغرافیای حاکم متفاوت بوده و رعایت اصول بهینه کشت می تواند از جنبه های مختلف بخصوص بهینه سازی الگوی مصرف آب کشاورزی بسیار مفید واقع شود (Vafaienejad, 2016).

با توجه به جدول (۲) بهینه ترین محصولات برای کشت در منطقه به ترتیب ذرت با ۳۹ درصد اولویت اول و بهینه کشت در ایستگاه های موردبررسی، جو با ۲۳ درصد اولویت اول و بهینه کشت در ایستگاه های موردبررسی، سیب زمینی با ۲۰ درصد اولویت اول و بهینه کشت در ایستگاه ها، گوجه فرنگی با ۲۰ درصد و گندم با یک درصد اولویت اول و بهینه کشت در ایستگاه ها معرفی گردیدند. نامطلوب ترین محصول برای کشت در استان های کشور نیز به ترتیب توتون، پنبه، لوبیا، برنج، چغندر قند و یونه شناخته شدند. این در حالی است که الگوی بهینه کشت محصولات برای تمامی ایستگاه های موردبررسی یکسان نبوده به طوری که برای ایستگاه هایی با اقلیم نیمه خشک سرد گرم (SA-K-W) اکثراً محصول ذرت، برای ایستگاه هایی با اقلیم خشک خنک خیلی گرم (A-C-VW) و نیمه خشک خنک خیلی گرم (SA-C-VW)، عموماً محصولات گوجه فرنگی و سیب زمینی، برای ایستگاه های خشک خنک گرم (A-C-VW) و خیلی مرطوب خنک گرم (PH-C-W)، محصول یونه به دست آمده است. با توجه به شکل (۴) محصولات لوبیا، پنبه و توتون در اکثر اقلیم ها دارای اولویت یکسانی هستند و این به صورت همپوشانی در اقلیم های مختلف نشان داده شده است. برای مثال محصول لوبیا در همه اقلیم ها در اولویت نهم بین محصولات موردبررسی برای کشت در



شکل ۴- وضعیت اولویت کشت محصولات در اقلیم های مختلف

محصولاتی است که بهینه‌ترین حالت را در کشت محصولات در هر اقلیم دارا باشند.

ارزیابی ردپای آب محصولات نشان داد که بیشترین مقدار ردپای آب کل عمدتاً مربوط به محصولات پنبه، توتون، برنج و لوبیا می‌باشد اما این به معنی بدترین محصولات برای کشت در اقلیم‌ها نیست چراکه بالا بودن ردپای آب نشان‌دهنده مصرف بالای آب این محصولات خواهد بود اما نوع آب مصرفی محصولات که صرفاً از منابع آب آبی باشند یا آب سبز متفاوت بوده و بالا بودن آب سبز محصولات نشان‌دهنده مصرف عمده این محصولات از منابع آب سبز بوده و می‌تواند در حفظ منابع آب آبی مؤثر واقع شود. بنابراین بررسی جامع‌تر در کنار سایر عوامل یافتن حالت بهینه ضرورتی بوده که در این تحقیق بدان پرداخته شد. ارزیابی بهینه‌سازی الگوی کشت نشان داد که بهینه‌ترین محصولات برای کشت در منطقه به ترتیب ذرت، جو، سیب‌زمینی، گوجه‌فرنگی و گندم بوده و نامطلوب‌ترین محصول برای کشت در استان‌های کشور نیز به ترتیب توتون، پنبه، لوبیا، برنج، چغندر قند و یونجه شناخته شدند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## REFERENCES

- Adnan, S. and Khan, A.H. (2009), Effective rainfall for irrigated agriculture plains of Pakistan. *Pakistan Journal Meteorology*, 6(11): 61-72.
- Aligholinia, T. Rezaie, H. Bahmanesh, J. and 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 Farsi).
- Aligholinia, T. Sheibany, H. Mohamadi, O. and Hesam, M. (2019), Comparison and evaluation of blue, green and gray water footprint of wheat in different climates of Iran. *Iran Water Resources Research*. 15(3): 234-245 (In Farsi).
- Allen, R.G. Pereira, L.S. Raes, D. and Smith, M. (1998), *Crop Evapotranspiration (Guidelines for Computing Crop Water Requirements)*. FAO Irrigation and Drainage, Paper, No. 56. FAO. Rome.
- Chapagain, A.K.B. and Hoekstra, A.Y. (2012), The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. *Ecological Economics* 70: 749-758.
- Chico, D. Aldaya, M. and Garrido, A. (2013), A water footprint assessment of a pair of jeans: the influence of agricultural policies on the sustainability of consumer products. *Cleaner Production* 57: 238-248.
- Deng, H. Yeh, C.H. and Willis, R.J. (2000), Inter-company Comparison Using Modified TOPSIS with Objective Weights, *Comput. Oper. Res.* 27: 963-973.
- Doorenbos, J. and Kassam, A. H. (1979), Yield response to water, FAO Drainage and Irrigation, Paper 33, FAO, Rome.
- Ene, A. S. Teodosiu, C. Robu, B. and Volf, I. (2013), Water footprint assessment in the winemaking industry: a case study of office paper. *Cleaner Production* 24: 30-35.
- Geng, Q. Wu, P. Zhao, X. and Wang, Y. (2014), A framework of indicator system for zoning of agricultural water and land resources utilization: a case study of Bayan Nur, Inner Mongolia. *Ecol. Indic.* 40: 43-50.
- Gerbens-Leenes, W. and Hoekstra, A.Y. (2012), The water footprint of sweeteners and bio-ethanol. *Environment International*. 40: 202-211.
- Gorgin paveh, F. Ramzani etedal, H. and Ababaie, B. (2016), Estimating the gray water footprint in important cereal producing countries in provincial and national scale. The Second National Congress of Irrigation and Drainage of Iran, Isfahan University of Technology (In Farsi).
- Herath, I. Green, S. Horne, D. Singh, R. and Clothier, B. (2014), Quantifying and reducing the water footprint of rain-fed potato production, part I: measuring the net use of blue and green water. *Cleaner Production* 81: 111-119.

## نتیجه‌گیری کلی

در برنامه‌ریزی منابع آب باید استفاده چندگانه، اهداف چندگانه و چندمنظوره بودن طرح‌ها را به حساب آورد. طرح‌های مختلف اهداف، جنبه‌ها و مطلوبیت‌های متفاوتی دارند. در برخورد نظام‌مند و سامانمند با منابع آب، مسئله به عناصر مختلف وابسته به هم تقسیم گردیده و ارتباط بین آن‌ها تعیین می‌گردد. در این حالت برنامه‌ریزی‌های موردنظر سهل‌تر و جامع‌تر می‌گردد. در این میان بهینه‌سازی به‌عنوان یک ابزار می‌تواند به تصمیم‌گیری کمک کند اما لازمه این کار آشنایی با بهینه‌سازی و انتخاب صحیح معیارها برای گزینه‌های موردنظر می‌باشد. چراکه در مسائل بهینه‌سازی، انتخاب بهترین گزینه، از راه تجزیه و تحلیل همه گزینه‌های پیش رو و بر اساس معیارهای مختلف و متنوع انجام می‌پذیرد. در این تحقیق نیز از مدل بهینه‌سازی تاپسیس جهت انتخاب الگوی کشت بهینه ۱۱ محصول زراعی در شش اقلیم حاکم در کشور با توجه به معیارهای ردپای آب کل، نسبت ردپای آب سبز به آب آبی، ردپای آب خاکستری، نیاز آبیاری و شاخص RIS، استفاده گردید. انتخاب این معیارها صرفاً بر اساس مصارف آب و آب مصرفی محصولات کشاورزی می‌باشد. یا این حال تمامی این معیارها باهم همسو نبوده و هدف نهایی در این تحقیق ارزیابی

- Hoekstra, A.Y. and Chapagain, A.K. (2007), Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resources Management* 21: 35–48.
- Hoekstra, A.Y. and Hung, P.Q. (2005), Globalization of water resources: International virtual water flows in relation to crop trade. *Global Environmental Change* 15:45-56.
- Hwang, C.L. and Yoon, K. (1981), *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*, Springer-Verlag, New York.
- Jefferies, D. Munoz, I. Hoedges, J. King, V.J. Aldaya, M.M. Ercin, A.E. Mila, I. Canals, L.L. and Hoekstra, A.Y. (2012), Water footprint and life cycle assessment as approaches to assess potential impacts of products on water consumption. Key learning points from pilot studies on tea and margarine. *Cleaner Production* 12: 155–166.
- Lovarelli, D. Bacenetti, J. and Fiala, M. (2017), Water Footprint of crop productions: A review. *Science of the Total Environment*. 548: 236-251.
- Malano, H. and Burton, M. (2001), Guidelines for Benchmarking Performance in the Irrigation and Drainage Sector. International Programmer for Technology and Research in Irrigation and Drainage (IPTRID), Italy.
- Mashaal, M. Varavipour, M. Sadat, N. and Zare Zirak, A. (2008), Optimization of corn water consumption depth with low irrigation (Case study: Varamin Plain). *Agricultural Research Journal (Water, Soil and Plant in Agriculture)* 8(6): 123-134. (In Farsi).
- Mohammadi, A. Yousefi, H. Noorollahi, Y. and Sadatinejad, S.J. (2017), Choosing the Best Province in Potato Production using Water Footprint Assessment. *Ecohydrology*. 4: 523-532. (In Farsi)
- Mohammad Khani, M.R. Zakeri, Z. and Maghsoudi, A. (2015), Water Footprint calculation for some selected products: Grey, Green and Blue Water Footprint in production and consumption, Islamic Parliament Research Center of the Islamic Republic of Iran, 237p. (In Farsi)
- Morillo, J.G. Díaz, J.A.R. Camacho, E. and Montesinos, P. (2015), Linking water footprint accounting with irrigation management in high value crops. *Cleaner Production* 87: 594–602.
- Nana, E. Corbari, C. and Bocchiola, D. (2014), A model for crop yield and water footprint assessment: Study of maize in the Po valley. *Agricultural Systems* 127: 139–149.
- Olson, D.L. (2004), Comparison of Weights in TOPSIS Models, *Math. Comput. Model.* 40: 721-727.
- Rasouli Majd, N. Montaseri, M. Bahmanesh, J. and 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 Farsi).
- Rodríguez Díaz, J.A. P\_erez, L. Camacho, E. and Montesinos, P. (2012), Modernizing water distribution networks. Lessons from the Bemb\_ezar MD irrigation district, Spain. *Outlook Agric.* 41 (4): 229-236.
- Rodriguez, C.I. de Galarreta, V.R. and Kruse, E.E. (2015), Analysis of water footprint of potato production in the pampean region of Argentina. *Journal of Cleaner Production*.
- Sepaskhah, A. Tavakoli, A. and Mousavi, S. (2006), Principles and Applications of Low Irrigation. Publication of Iran's National Irrigation and Drainage Committee. (In Farsi).
- Tajrishi, M. and Abrishamchi, A. (2004), Water Resource Demand Management in the Country. First Conference on Wastewater Prevention Methods. Tehran, Academy of Sciences of the Islamic Republic of Iran. (In Farsi).
- Tavana, M. and Marbini, A.H. (2011), A Group AHP-TOPSIS Framework for Human Spaceflight Mission Planning at NASA Exp. Syst. Appl. 38: 13588–13603.
- Vafaienejad, A. (2016), Optimization of Crop Pattern Using TOPSIS Method and Genetic Algorithm Based on GIS Capabilities Case Study: Field Plants, Isfahan Province. *Ecohydrology*. doi: 10.22059/ije.2016.59191. (In Farsi).
- UNESCO (1979) Map of the world distribution of arid regions. Map at scale 1:25,000,000 with explanatory note. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris, 54 pp. ISBN 92-3-101484-6
- Yevjevich, V. (1995), Effect of area time horizons in comprehensive and integrated water resources management, *Water Science and Technology*, Vol. 31(8):19-25.
- Zare Abyaneh, H. Bayat varkeshi, M. Sabzi Parvar, A.K. Maroufi, S. and Ghasemi, A. (2010), Estimation of estimation methods of evapotranspiration of the reference plant and its zoning in Iran. *Natural Geographic Research* 74:110-95 (In Farsi).
- Et, L. and Hoekstra, A.Y. (2017), The effect of different agricultural management practices on irrigation efficiency, water use efficiency and green and blue water footprint. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*. 4: 185-194.