

## مطالعه شاخص ردپای آب برای محصولات غالب مورد کشت در حوضه آبریز دریاچه ارومیه و ارتباط آن با مدیریت آبیاری

توحید علیقلی نیا<sup>۱</sup>، حسین رضایی<sup>۲\*</sup>، جواد بهمنش<sup>۳</sup>، مجید منتصری<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۹۴/۲/۱۵

تاریخ پذیرش: ۹۶/۶/۲۵

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب (آبیاری و زهکشی)، دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه

<sup>۲</sup> و <sup>۳</sup> دانشجویان گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: h.rezaie@urmia.ac.ir

### چکیده

شناسایی و ارزیابی مقدار آب واقعی مورد استفاده محصولات مختلف کشاورزی دارای اهمیت بالایی بوده و چنین ارزیابی می‌تواند در شناخت و ارائه راهکارهای مناسب برای کاهش مصرف آب کشاورزی بسیار موثر باشد. در این تحقیق به منظور ارزیابی وضعیت محصولات تولیدی از نظر آبیاری و آب مصرفی به ازاء محصول تولیدی کشاورزی، از شاخص‌های تأمین نسبی آب آبیاری (RIS) (شاخصی که بیشتر از ۱ بیانگر مصرف بیشتر و کمتر از ۱ بیانگر مصرف کمتر آب آبیاری است) و ردپای آب (WF) برای عمده محصولات کشت شده در حوضه دریاچه ارومیه استفاده گردید. ردپای آب محصولات در دو جزء آب آبی (WF blue) و آب سبز (WF green) برآورد شده سپس به منظور اعمال تأثیر راندمان آبیاری در محاسبه میزان آب مصرفی محصولات، ردپای آب آبی واقعی (WFA blue) نیز محاسبه گردید. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار ردپای آب مربوط به محصول گندم در ایستگاه مراغه بوده که در آن مقدار ردپای آب آبی  $1779/77 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1}$ ، ردپای آب سبز  $729/96 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1}$  و ردپای آب واقعی  $2150/91 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1}$  می‌باشد. همچنین کمترین مقدار ردپای آب مربوط به محصول ذرت در ایستگاه سراب بوده و مقدار ردپای آب آبی، ردپای آب سبز، ردپای آب آبی واقعی آن به ترتیب  $99/86 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1}$ ،  $19/75 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1}$  و  $165/28 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1}$  می‌باشند. مقادیر شاخص تأمین نسبی آب آبیاری (RIS) در هفت ایستگاه هواشناسی اطراف حوضه دریاچه ارومیه برای محصولات غالب زراعی تعیین گردید و این شاخص در تمام محصولات بیش‌آبیاری را نشان می‌دهد. این درحالی است که دو محصول یونجه و گندم، از نظر مقدار شاخص RIS دارای مقادیری کمتری نسبت به سایر محصولات داشتند.

واژه‌های کلیدی: حوضه دریاچه ارومیه، ردپای آب، شاخص تأمین نسبی آب آبیاری، RIS

## Water Footprint Index Study for dominant crops in Urmia lake basin and its relationship with irrigation management

T Aligholinia<sup>1</sup>, H Rezaei<sup>2\*</sup>, J Behmanesh<sup>2</sup>, M Montaseri<sup>2</sup>

Received: 5 May 2017 Accepted: 16 September 2017

<sup>1</sup>- M. Sc. Student in Irrigation & drainage, Univ. of Urmia, Iran

<sup>2</sup>- Assoc. Prof., Dept., of Water Engineering, Univ. of Urmia, Iran

\*Corresponding Author, Email: h.rezaie@urmia.ac.ir

### Abstract

Detection and evaluation of the actual amount of water used for different agricultural products is of paramount importance that such an assessment can identify and provide appropriate solutions to reduce water consumption in agriculture very effectively. In this research, to evaluate the agricultural products from view point of irrigation and water consumption, the Relative Irrigation Supply (RIS) as an indicator that shows accuracy of excessive irrigation when its value is more than 1, else when its value is less than 1 the consumed water is less than irrigation requirement and water footprint indicators (WF) were used for main crops in Urmia lake basin. The water footprint of products was estimated for two components of blue water (WF blue) and green water (WF green). Then actual water footprint was calculated by applying irrigation efficiency. The results showed that the maximum amount of water footprint was for wheat in Maragheh station, in which the blue, green and actual blue water footprints were 1779.77, 729.96 and 2150.91 m<sup>3</sup> ton<sup>-1</sup>, respectively. Also the lowest water footprint was for corn in Sarab station in which the blue, green and actual blue water footprint were 99.86 m<sup>3</sup> ton<sup>-1</sup>, 19.75 m<sup>3</sup> ton<sup>-1</sup> and 165.28 m<sup>3</sup> ton<sup>-1</sup> respectively. The Relative Irrigation Supply index (RIS) values were determined for main crops in seven meteorological stations of Lake Urmia basin and this index showed an excessive irrigation for all crops. While alfalfa and wheat, had less amount of RIS than other products.

**Keywords:** Water footprint, Relative irrigation supply, Urmia Lake basin, RIS

موسسه تحقیقات مدیریت آب و خاک کشور، حدود ۶۷ درصد آب در بخش کشاورزی مصرف می‌شود و این میزان در کشورهای در حال توسعه نزدیک به ۹۰ درصد می‌باشد (محمدی و همکاران) (۱۳۸۸). این در حالی است که مرکز توسعه جهانی آب سازمان ملل متحد، این رقم را در ایران ۹۳ تا ۹۴ درصد گزارش کرده است. نتایج تحقیقات انجام شده توسط سازمان خواروبار کشاورزی در ۹۳ کشور در حال توسعه

### مقدمه

بررسی وضعیت موجود کشاورزی بیانگر آن است که با وجود پتانسیل افزایش تولید محصولات کشاورزی، به دلیل فقدان سیستم مدیریتی صحیح امکان استفاده بهینه از منابع موجود آب و خاک میسر نشده است. در این راستا بررسی راهکارهای استفاده بهینه آب از طریق بازنگری در تخصیص منابع آب و مدیریت آن امری لازم و ضروری است. طبق گزارش‌های

شاخص (شاخص ردپای آب) در سال‌های اخیر به‌طور گسترده‌ای توسط متخصصین در نقاط مختلف دنیا مورد استفاده شده و محققان بسیاری میزان آب واقعی محصولات مختلف نظیر گندم (هواکسترا و چپاگین ۲۰۰۷)، چای (جفریز و همکاران ۲۰۱۲)، برنج (چپاگین و هواکسترا ۲۰۱۲)، پنبه (چیکو و همکاران ۲۰۱۳)، انگور (انه و همکاران ۲۰۱۳)، ذرت (نانا و همکاران ۲۰۱۴)، سیب‌زمینی (هرات و همکاران ۲۰۱۴ و رودریگز و همکاران ۲۰۱۵) مورد بررسی قرار دادند. هواکسترا و هانگ (۲۰۰۵) در تحقیقاتشان، ردپای آب کشورهای مختلف از جمله ایران را برای دوره (۱۹۹۹-۱۹۹۵) برآورد نمودند. مطابق تحقیقات آن‌ها، بیشترین ردپای آب (حدود ۲۰۰۰ مترمکعب در سال به ازاء هر نفر) برای کشورهای بلژیک و هلند و کمترین ردپای آب (در حدود ۵۰۰ مترمکعب در سال به ازاء هر نفر) برای کشورهای چین، هند و اندونزی برآورد شده است. ردپای آب ایران، به ازاء هر نفر ۱۴۵۷ مترمکعب در سال، خودکفایی آبی کشور ۹۳/۶٪ و وابستگی به منابع آب خارجی ۶/۴٪ محاسبه شده است (۶/۴٪ از پتانسیل منابع آب کشور به صورت وارداتی از طریق محصولات کشاورزی و صنعتی و ... انجام می‌گیرد) (هواکسترا و هانگ) (۲۰۰۵). با توجه به قرارگیری ایران در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهانی و همچنین پایین بودن سطح کاربرد تکنولوژی در بخش کشاورزی، بالا بودن ردپای آب ملی نسبت به میانگین جهانی (حدود ۱۰۰۰ مترمکعب در سال به ازاء هر نفر) قابل حدس و پیش‌بینی است. لذا لزوم یکپارچه‌نگری، یافتن منابع جدید و استفاده از روش‌های مدیریتی مبتنی بر یکپارچه نگری راه‌هایی است که برای جلوگیری از بروز بحران در بخش آب پیشنهاد شده است (مکنون و سهرابی) (۱۳۹۰).

در سال‌های اخیر با ظهور شاخص ردپای آب که نمایشی از مجموع مصارف مستقیم و غیرمستقیم در بخش‌های مختلف جامعه است، دریچه‌ای برای انجام تحقیقات در راستای مدیریت نوین منابع آب با رویکرد یکپارچه باز شده است. زیرا این شاخص، روش مناسبی برای ارزیابی ارتباط بین آب مورد استفاده و عملکرد محصول می‌باشد. با این حال شاخص ردپای آب نمی-

نشان داد که ذخیره منابع آبی در کشورهای مورد مطالعه در حال کاهش است، درحالی‌که جای‌گزینی این منابع امکان‌پذیر نبوده و ۱۰ کشور در شرایط بحرانی قرار دارند که ایران نیز یکی از این کشورها محسوب می‌شود و افزایش تولیدات کشاورزی از طریق توسعه اراضی کشاورزی با محدودیت‌های جدی تأمین آب مواجه است. بنابراین اطلاع از نیاز آبی و مقدار واقعی آب مصرفی محصولات کشاورزی به‌منظور هرگونه برنامه‌ریزی در مدیریت پایدار منابع آب و رسیدن به تعادل آبی متناسب با منابع موجود، امری بدیهی و لازم‌الاجرا است. اما از آنجایی‌که میزان آب مصرفی پایه و ردپای آب هر محصول تحت تأثیر اقلیم منطقه، میزان تولیدات، الگوی مصرفی، عملیات کشاورزی و راندمان کاربرد آب متغیر است، لذا نیاز به شاخصی است که بتوان با آن نیاز واقعی هر محصول را مورد ارزیابی قرار داد.

یکی از جدیدترین شاخص‌ها در بحث مدیریت پایدار منابع آب، شاخص ردپای آب<sup>۱</sup> می‌باشد که توسط هواکسترا در سال ۲۰۰۲ معرفی گردید. این شاخص نشان‌دهنده مقدار مصرف آب و آثار آب مصرفی در تولید محصولات و ارائه خدمات بوده که از سه بخش تشکیل شده است: مصارف ناشی از آب‌های سطحی و زیرزمینی که مستقیماً به‌منظور آبیاری مورد استفاده قرار می‌گیرند، آب مصرفی که به صورت رطوبت از بارش در پروفیل خاک ذخیره شده و حجم آب شیرین که برای رفع آلودگی آب مورد نیاز است که به ترتیب آب آبی<sup>۲</sup>، آب سبز<sup>۳</sup> و آب خاکستری<sup>۴</sup> تعریف گردیده است (هواکسترا و چپاگین ۲۰۰۷). هواکسترا و هانگ (۲۰۰۲) با معرفی شاخص ردپای آب توانستند اطلاعات مفیدی را در ارتباط بین الگوی مصرفی افراد و به‌دنبال آن میزان آب مصرفی در انواع مختلف محصولات کشاورزی در راستای تولید محصولات مختلف، مبادلات جهانی و مدیریت منابع آب را ارائه دهند. این

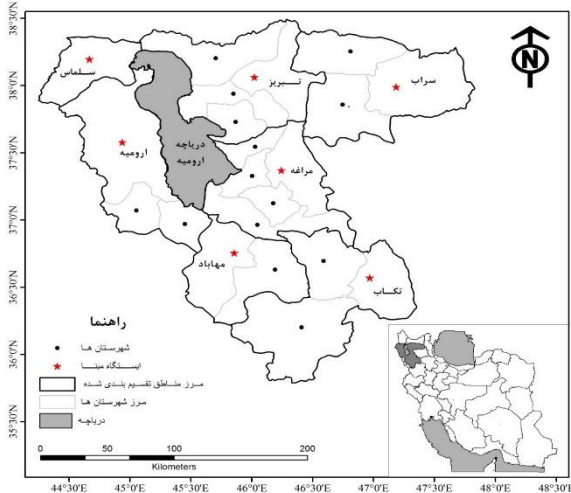
<sup>۱</sup>Water footprint

<sup>۲</sup>Blue water footprint

<sup>۳</sup>Green water footprint

<sup>۴</sup>Grey water footprint

از سازمان هواشناسی کشور تهیه گردید و پس از مرتب‌سازی به نرم‌افزار معرفی گردید.



شکل ۱- تقسیم‌بندی حوضه و موقعیت ایستگاه‌های منتخب.

به‌منظور محاسبه تبخیر و تعرق مرجع از روش فائو - پنمن-مونتیت که در رابطه (۱) ارائه شده است به‌عنوان مبنای محاسبات تبخیر و تعرق استفاده گردیده است.

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

که در آن :

$ET_0$ : تبخیر- تعرق مرجع حسب  $(\text{mm day}^{-1})$  ،  
 $R_n$ : تابش خالص در سطح پوشش گیاهی حسب  $(\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1})$  ،  
 $T$ : متوسط دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین حسب  $(^\circ\text{C})$  ،  
 $U_2$ : متوسط سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین بر حسب  $(\text{m s}^{-1})$  ،  
 $(e_s - e_a)$ : کمبود فشار بخار در ارتفاع ۲ متری بر حسب  $(\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1})$  ،  
 $\Delta$ : شیب منحنی فشار بخار حسب  $(\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1})$  ،  
 $\gamma$ : ضریب رطوبتی حسب  $(\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1})$  و  $G$ : شار گرما به داخل خاک بر حسب  $(\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1})$  می‌باشند.

داده‌های مربوط به مشخصات گیاهی شامل طول دوره رشد، ارتفاع گیاه، عملکرد محصولات، عمق ریشه و ضریب گیاهی از آمارنامه‌های کشاورزی، سند ملی

تواند اطلاعاتی در مورد مدیریت آبیاری، کمبود آبیاری، بیش‌آبیاری و یا آب مورد نیاز محصول در حین فرآیند رشد را در اختیار بگذارد. بنابراین به‌منظور ارزیابی هرچه بهتر آب مصرفی در بخش کشاورزی، لازم است که شاخص ردپای آب با شاخص‌های کارآتر در مدیریت آبیاری ترکیب شده و مورد استفاده قرار گیرد. در این تحقیق ضمن محاسبه ردپای آب محصولات زراعی غالب کشت شده در اراضی حوضه دریاچه ارومیه به ارزیابی مشترک ردپای آب محصول و مدیریت آبیاری با استفاده از شاخص‌های کارآتر و جدید به‌منظور شناسایی نقش مدیریت آبیاری در مقدار واقعی آب مصرفی و ردپای آب محصول پرداخته خواهد شد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه و محصولات مورد بررسی

جهت بررسی ردپای آب محصولات در قسمت‌های مختلف حوضه دریاچه ارومیه، کل حوضه مورد مطالعه به هفت منطقه تقسیم‌بندی گردید (شکل ۱). نحوه تقسیم‌بندی مناطق بر اساس مختصات جغرافیایی، تقسیمات شهری، منابع آب موجود و محصولات تولیدی، صورت گرفت. در نهایت برای هر منطقه یک ایستگاه به‌عنوان ایستگاه مبنای انتخاب گردید. بدین ترتیب ایستگاه‌های سلماس، ارومیه، مهاباد، تکاب، تبریز، مراغه و سراب به‌عنوان ایستگاه‌های مبنای معرفی گردیدند. همچنین در این تحقیق برای بررسی ردپای آب محصولات زراعی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، پنج محصول عمده مورد کشت در حوضه شامل، گندم، چغندر قند، گوجه‌فرنگی، یونجه و ذرت مورد بررسی قرار گرفته و ردپای آب آن‌ها محاسبه گردید.

### داده‌ها و نرم‌افزارها

در این تحقیق از نرم‌افزار CropWat 8.0 به‌منظور محاسبه تبخیر-تعرق و نیاز آبی گیاهان استفاده گردید. داده‌های مورد نیاز جهت محاسبه تبخیر و تعرق شامل دمای کمینه، دمای بیشینه، درصد رطوبت نسبی، ساعات آفتابی، سرعت باد و بارندگی در مقیاس ماهانه

قابل قبول مواد (Cmax) و غلظت طبیعی مواد آلوده کننده (Cnat) و در نهایت عملکرد محصول (Y) به صورت رابطه ۵ محاسبه می شود. لازم به ذکر است آلاینده ها به طور کلی از آلودگی های (نیترژن، فسفر و ...) و همچنین آفت کش ها و حشره کش ها ایجاد می شوند. همان طور که ذکر شد جزء آب خاکستری حجم آبی است که طی فرآیند تولید محصول آلوده شده و کیفیت اولیه خود را از دست می دهد ولی می توان این آب را در مناطق خشک که در آن ارزش آب بسیار بالاست دوباره با انجام عمل تصفیه مورد استفاده قرار داد. اما از آنجایی که هدف اصلی تحقیق بررسی وضعیت آب آبیاری مورد استفاده در تولید محصول (حجم آبی که امکان بازگشت دوباره آن به چرخه محیط وجود ندارد) می باشد و نقش مقدار جزء آب خاکستری در محاسبات ردپای آب کل در مقایسه با دو جزء دیگر (جزء آبی و سبز) بسیار کمتر می باشد، در این تحقیق از محاسبه جزء خاکستری صرف نظر گردید.

اجزا مصرف آب محصول (CWU) سبز و آبی نیز از مجموع تبخیر-تعرق روزانه در تمام دوره رشد یک گیاه به صورت رابطه ۵ و ۶ محاسبه می گردند.

$$CWU_{green} = 10 * \sum_{d=1}^{l_{gp}} ET_{green} \quad [۶]$$

$$CWU_{blue} = 10 * \sum_{d=1}^{l_{gp}} ET_{blue} \quad [۷]$$

که در آن:

ETgreen: نشان دهنده تبخیر-تعرق آب سبز (تبخیر-تعرق ناشی از آب باران مورد استفاده گیاه) و ETblue: نشان دهنده تبخیر-تعرق آب آبی (تبخیر-تعرق ناشی از آب آبیاری مورد استفاده گیاه) برحسب (mm year<sup>-1</sup>) می باشند. عدد ۱۰ نیز به منظور تبدیل عمق آب در میلی متر به حجم آب در سطح زمین m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> بوده است. در فرمول های ۶ و ۷، lgp طول دوره رشد برحسب روز می باشد. بدین ترتیب منظور از مجموع داده های تبخیر-تعرق در طول دوره رشد یعنی محاسبه مجموع تبخیر-تعرق روزانه گیاه از روز اول کاشت گیاه تا روز برداشت آن می باشد. جزء آبی مورد

کشور و آمارنامه های سازمان خواروبار جهانی (FAO) استخراج و مورد استفاده قرار گرفت.

### محاسبات ردپای آب

ردپای آب یک محصول از حاصل جمع سه جزء آب آبی، آب سبز و آب خاکستری به دست می آید (رابطه ۲).

$$WF_i = WF_{i green} + WF_{i blue} + WF_{i grey} \quad [۲]$$

که در آن:

WF<sub>i</sub>: ردپای آب کل محصول i (m<sup>3</sup> ton<sup>-1</sup>),  
WF<sub>i green</sub>: ردپای آب سبز محصول i (m<sup>3</sup> ton<sup>-1</sup>) می باشد که شامل حجمی از آب باران موثر است که به صورت رطوبت در خاک ذخیره می شود. WF<sub>i blue</sub>: ردپای آب آبی محصول i (m<sup>3</sup> ton<sup>-1</sup>) است که برای آب های مورد استفاده از منابع سطحی و زیرزمینی محاسبه می گردد. WF<sub>i grey</sub>: نیز به عنوان آب خاکستری محصول i (m<sup>3</sup> ton<sup>-1</sup>) تعریف می شود و به حجم آبی اطلاق می گردد که برای از بین بردن آلودگی های ایجاد شده ناشی از کشت گیاه و تولید محصول در محیط، مورد استفاده قرار می گیرد.

ردپای آب هر جز نیز طبق روابط ۳ تا ۵ به دست می آید:

$$WF_{i green} = \frac{CWU_{green}}{Y} \quad [۳]$$

$$WF_{i blue} = \frac{CWU_{blue}}{Y} \quad [۴]$$

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

که در روابط ۳ تا ۵:

Y: عملکرد گیاهان زراعی برحسب (ton ha<sup>-1</sup>),  
CWUgreen و CWUblue، به ترتیب جزء آب سبز و جزء آب آبی محصول برحسب (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) می باشند که طبق روابط ۶ و ۷ محاسبه می گردند. مقدار جزء خاکستری ردپای آب (WF<sub>proc/grey</sub>) نیز توسط مقدار مواد شیمیایی مورد استفاده در هر هکتار از زمین زراعی (AR)، کسر آبشویی (α) و حداکثر غلظت

نسبتی از  $S_{max}$  بوده که در آن یک محصول می‌تواند آب مورد نیاز خود را بدون تنش از منطقه ریشه جذب نماید، می‌باشد.

### شاخص تأمین نسبی آب آبیاری<sup>۱</sup> (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 بین المللی فناوری و پژوهش در آبیاری و زهکشی<sup>۲</sup> (IPTRID) معرفی گردید و در سال های اخیر 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 (مولانو و بورتون ۲۰۰۱، رودریگز و همکاران ۲۰۰۸). مقدار این شاخص از رابطه (۱۱) به دست می‌آید.

$$RIS = \frac{WAg}{10*(ETc - Pe)} \quad [11]$$

در رابطه ۱۱،  $WAg$  ( $m^3 ha^{-1}$ ): حجم آب آبیاری است که در مزرعه برای تولید محصول مورد استفاده قرار می‌گیرد.  $ETc$  ( $mm year^{-1}$ ) و  $Pe$  ( $mm year^{-1}$ ) به ترتیب مقادیر مربوط به تبخیر-تعرق و بارندگی مؤثر می‌باشند. عدد ۱۰ نیز به منظور تبدیل عمق آب از میلی متر به حجم آب در سطح واحد  $m^3 ha^{-1}$  است. براساس رابطه فوق، در آبیاری کامل (تأمین آب مورد نیاز گیاه)، صورت و مخرج رابطه با هم برابر بوده و عدد ۱ برای شاخص RIS به دست می‌آید. این در حالی است که در عمل اغلب مقدار شاخص RIS دقیقاً برابر ۱ نبوده و مقادیر مربوط به آن بیشتر و یا کمتر از ۱ به دست می‌آید. هرچه مقدار شاخص RIS از ۱ بیشتر باشد، نشان‌دهنده آبیاری بی‌رویه و هرچه این نسبت کمتر از ۱ باشد نشان‌دهنده کم آبیاری می‌باشد.

### نتایج و بحث

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، مقدار آب نیز به صورت غیرمستقیم مورد مصرف قرار می‌گیرد که این مصارف غیرمستقیم آبشویی خاک، آبیاری‌هایی که بدلیل جلوگیری از سرمازدگی و بیش‌آبیاری‌هایی که به دلیل راندمان پایین آبیاری مصرف می‌شود، را شامل می‌گردد. موریلو و همکاران (۲۰۱۵) با توجه به مفاهیم و توضیحات ذکر شده، به منظور محاسبه جزء آبی واقعی مورد استفاده در تولید محصولات رابطه ۸ را به صورت زیر ارائه دادند:

$$CWA_{blue} = WAg + \sum_{i=1}^n WAi \quad [8]$$

در رابطه ۸،  $WAg$ : مقدار آب مستقیم مصرفی (بر اساس نیاز آبی) و  $WAi$ : مقدار آبی است که به صورت غیرمستقیم (آبشویی، راندمان‌های کمتر، جلوگیری از سرمازدگی و ...) برحسب ( $m^3 ha^{-1}$ ) مورد استفاده قرار می‌گیرند.

به منظور محاسبه تبخیر-تعرق روزانه نیز از رابطه پیشنهادی آلن و همکاران مطابق رابطه ۹ استفاده گردید (آلن و همکاران ۱۹۹۸).

$$ET = Ks[t] * Kc[t] * ETo[t] \quad [9]$$

که در آن:  $Kc[t]$ : ضریب گیاهی و  $Ks[t]$ : عامل بدون بعد کاهش تعرق که وابسته به آب قابل‌دسترس در خاک می‌باشد.  $ETo[t]$ : نیز تبخیر-تعرق گیاه مرجع می‌باشد.  $Ks[t]$ : تابع روزانه بیشینه مقدار واقعی رطوبت قابل‌دسترس در ناحیه ریشه خاک می‌باشد که به صورت رابطه ۱۰ قابل محاسبه است.

$$Ks[t] = \begin{cases} \frac{S[t]}{(1-p)*S_{max}[t]}, & S[t] < (1-p)*S_{max}[t] \\ 1, & \text{other wise} \end{cases} \quad [10]$$

که در رابطه (۱۰):

$S_{max}[t]$ : ماکزیمم رطوبت قابل‌دسترس در

ناحیه ریشه خاک در شرایط ظرفیت زراعی زمین و  $p$

<sup>1</sup> Relative irrigation supply

<sup>2</sup> International Programmer for Technology and Research in Irrigation and Drainage

بارندگی می‌تواند به شدت مقادیر مربوط به هر دو جزء آب آبی و سبز را تحت تأثیر قرار دهد. جدول ۱ نشان می‌دهد که در بخش غربی حوضه آبریز دریاچه ارومیه (ایستگاه‌های ارومیه، سلماس، تکاب و مهاباد) از نظر آب سبز مناطق مساعدی برای کشت محصولات زراعی بوده و بخش شرقی حوضه (ایستگاه‌های تبریز، سراب و مراغه) دارای مقادیر آب آبی بیشتری می‌باشد. بالا بودن میزان آب آبی مصرفی محصولات زراعی در شرق حوضه و استفاده بیشتر از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی در دسترس در این مناطق، میزان کل ردپای آب محصولات زراعی را بیشتر نموده و این مناطق را از نظر کشت محصولات پرمصرف به‌عنوان مناطق نامساعد معرفی می‌گردد.

شاخص ردپای آب، روش مناسبی برای ارزیابی ارتباط بین آب مورد استفاده و عملکرد محصول می‌باشد. با این حال این شاخص نمی‌تواند اطلاعاتی در مورد مدیریت آبیاری، کمبود آبیاری، بیش‌آبیاری و یا آب مورد نیاز محصول در حین فرآیند رشد را در اختیار بگذارد. بنابراین به‌منظور ارزیابی هرچه بهتر وضعیت آبیاری و آب مصرفی در بخش کشاورزی، از شاخص تأمین نسبی آب آبیاری (RIS) برای تمامی محصولات مورد مطالعه استفاده گردید. مقادیر مربوط به شاخص RIS برای تمامی محصولات مورد بررسی در همه ایستگاه‌ها بیشتر از ۱ محاسبه شده است (جدول ۱) که این نشان‌دهنده آبیاری بی‌رویه در تمامی محصولات می‌باشد. جهت بررسی وضعیت کلی آبیاری در هر یک از ایستگاه‌ها، روند تغییرات شاخص RIS برای تمام محصولات مورد مطالعه در شکل ۲ ارائه گردیده است.

متوسط ردپای آب محصولات در سه جزء آب آبی (Wfc blue)، آب سبز (Wfc green) و آب آبی واقعی (WFA blue) و همچنین مقادیر شاخص RIS برای پنج محصول مورد بررسی شامل گندم، چغندر قند، گوجه‌فرنگی، یونجه و ذرت برای تمامی ایستگاه‌ها محاسبه گردید (جدول ۱). علی‌رغم نزدیکی ایستگاه‌های مورد بررسی و مشابهت آب و هوایی و وضعیت اقلیمی، روند تغییرات نامنظمی در سری داده‌ها دیده می‌شود. با توجه به جدول ۱، بیشترین مقدار ردپای آب مربوط به محصول گندم در ایستگاه مراغه بوده که در آن مقدار ردپای آب آبی  $1779/77 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1}$ ، ردپای آب سبز  $3 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1}$  و ردپای آب آبی واقعی  $2159/91 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1}$  می‌باشد. در ضمن کمترین مقدار ردپای آب مربوط به محصول ذرت در ایستگاه سراب بوده که مقادیر ردپای آب آبی، ردپای آب سبز و ردپای آب آبی واقعی به ترتیب  $99/86 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1}$ ،  $19/75 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1}$  و  $165/28 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1}$  می‌باشند. کمترین مقدار ردپای آب سبز نیز برای محصول ذرت با  $12/16 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1}$  در تبریز و بیشترین مقدار آن برابر با  $985/48 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1}$  برای محصول گندم در ارومیه محاسبه گردید.

در محصولات مورد بررسی، گندم و یونجه در مقابل چغندر قند، گوجه‌فرنگی و ذرت علوفه‌ای ردپای آب کل بیشتری دارند، لذا این محصولات (گندم و یونجه) برای تولید مقدار واحد، آب بیشتری مصرف می‌نمایند در شرایطی که تقریباً ۳۰٪ آب مصرفی این محصولات از آب سبز (رطوبت موجود در خاک، بدون آبیاری) تأمین گردیده است. دو جزء آب آبی و سبز نشان‌دهنده مقدار آب مصرفی گیاه از منابع آب‌های زیرزمینی و سطحی ناشی از بارندگی می‌باشد. لذا تغییر در میزان

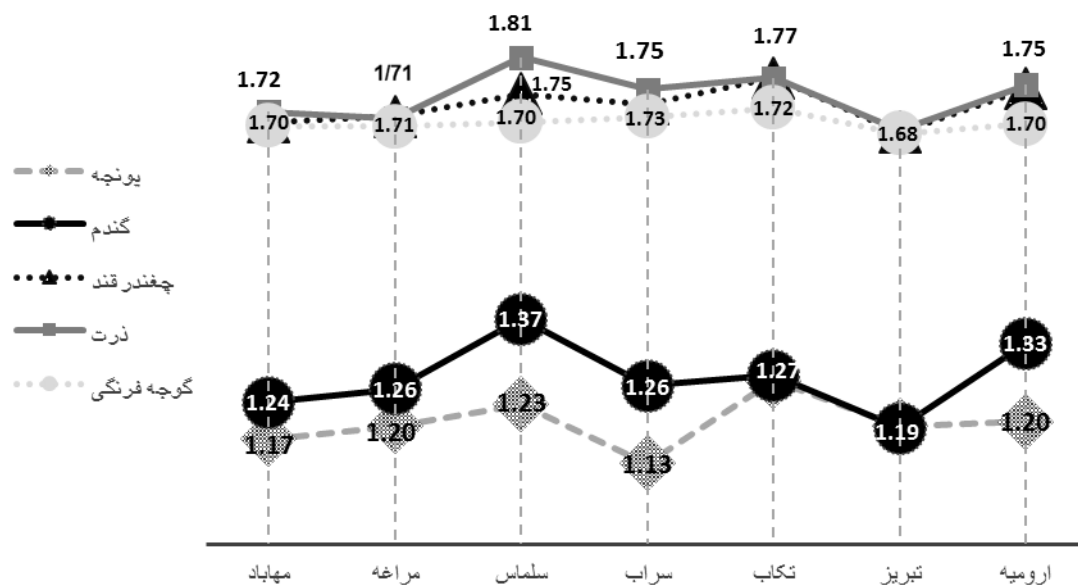
جدول ۱- متوسط ردپای آب محصولات در سه جزء آب آبی (Wfc blue)، آب سبز (Wfc green) و آب آبی واقعی (WFA blue) و شاخص RIS در ایستگاه‌های مورد بررسی.

| چغندر قند |          |          |      | گندم      |          |          |      | شهر    |
|-----------|----------|----------|------|-----------|----------|----------|------|--------|
| Wfc green | Wfc blue | WFA blue | RIS  | Wfc green | Wfc blue | WFA blue | RIS  |        |
| ۳۴/۹۷     | ۱۵۵/۴۵   | ۲۵۰/۳۹   | ۱/۷۵ | ۹۸۵/۴۸    | ۹۴۷/۰۳   | ۱۲۱۸/۳۸  | ۱/۳  | ارومیه |
| ۲۸/۶۷     | ۲۸۹/۳۰   | ۴۶۸/۷۶   | ۱/۶۸ | ۶۱۵/۲۳    | ۱۷۷۰/۹۰  | ۲۰۳۶/۷۹  | ۱/۱۹ | تبریز  |

|       |        |        |      |        |         |         |      |        |
|-------|--------|--------|------|--------|---------|---------|------|--------|
| ۲۸/۱۶ | ۱۶۰/۹۴ | ۲۶۳/۹۴ | ۱/۷۷ | ۹۶۹/۱۳ | ۹۲۵/۶۳  | ۱۱۳۱/۵۵ | ۱/۲۸ | تکاب   |
| ۴۳/۶۴ | ۲۰۰/۲۱ | ۳۳۰/۰۱ | ۱/۷۲ | ۶۹۳/۲۲ | ۱۵۵۳/۷۴ | ۱۸۹۲/۹۶ | ۱/۲۶ | سراب   |
| ۴۶/۰۸ | ۱۶۰/۳۷ | ۲۶۱/۲۵ | ۱/۷۵ | ۸۲۲/۰۶ | ۱۰۵۹/۴۱ | ۱۳۶۲/۳۵ | ۱/۳۷ | سلماس  |
| ۲۹/۵۴ | ۲۹۴/۷۸ | ۴۸۰/۶۷ | ۱/۷۱ | ۷۲۹/۹۶ | ۱۷۷۹/۷۷ | ۲۱۵۹/۹۱ | ۱/۲۶ | مراغه  |
| ۲۵/۳۳ | ۱۶۸/۱۰ | ۲۷۳/۹۷ | ۱/۷  | ۸۲۲/۹۲ | ۱۳۵۰/۹۶ | ۱۶۱۰/۸۰ | ۱/۲۴ | مهاباد |

| یونجه     |          |          |      | گوجه‌فرنگی |          |          |      | شهر    |
|-----------|----------|----------|------|------------|----------|----------|------|--------|
| WFc green | WFc blue | WFA blue | RIS  | WFc green  | WFc blue | WFA blue | RIS  |        |
| ۴۴۷/۶۲    | ۷۹۱/۱۵   | ۸۷۹/۳۳   | ۱/۲  | ۵۴/۳۵      | ۲۰۴/۵۵   | ۳۲۸/۴۵   | ۱/۷  | ارومیه |
| ۲۰۸/۵۵    | ۹۱۳/۵۱   | ۱۰۵۳/۱۴  | ۱/۲  | ۲۷/۳۷      | ۲۶۸/۳۶   | ۴۳۵/۱۰   | ۱/۶۸ | تبریز  |
| ۴۱۰/۴۶    | ۷۹۲/۹۸   | ۹۳۴/۸۰   | ۱/۳۷ | ۴۵/۵۱      | ۲۱۲/۰۷   | ۳۴۷/۷۹   | ۱/۷۲ | تکاب   |
| ۲۵۷/۹۱    | ۷۲۰/۵۹   | ۷۷۷/۷۱   | ۱/۱۳ | ۴۳/۵۱      | ۱۸۴/۱۵   | ۳۰۳/۴۸   | ۱/۷۱ | سراب   |
| ۴۳۷/۳۹    | ۸۲۱/۵۵   | ۹۱۴/۸۱   | ۱/۲۳ | ۷۰/۲۷      | ۲۱۱/۲۰   | ۳۴۴/۱۶   | ۱/۷  | سلماس  |
| ۲۲۶/۹۵    | ۹۴۳/۲۷   | ۱۰۸۶/۵۹  | ۱/۲  | ۳۰/۷۸      | ۲۷۰/۵۴   | ۴۴۱/۶۶   | ۱/۶۹ | مراغه  |
| ۳۶۹/۱۷    | ۹۵۵/۷۴   | ۱۰۷۹/۰۱  | ۱/۱۷ | ۳۶/۴۸      | ۲۲۸/۰۷   | ۳۷۲/۵۶   | ۱/۶۹ | مهاباد |

| متوسط حوضه |          |          |      | ذرت       |          |          |      | شهر    |
|------------|----------|----------|------|-----------|----------|----------|------|--------|
| WFc green  | WFc blue | WFA blue | RIS  | WFc green | WFc blue | WFA blue | RIS  |        |
| ۳۰۹/۶۸     | ۴۴۷/۳۰   | ۵۸۰/۰۲   | ۱/۵۵ | ۲۶/۰۰     | ۱۳۸/۳۴   | ۲۲۳/۵۷   | ۱/۷۶ | ارومیه |
| ۱۷۸/۴۰     | ۶۷۷/۲۵   | ۸۴۵/۵۸   | ۱/۴۹ | ۴۳۰۸۵     | ۱۴۴/۱۹   | ۲۳۴/۱۰   | ۱/۶۹ | تبریز  |
| ۲۹۴/۷۵     | ۴۴۶/۹۳   | ۵۸۲/۶۰   | ۱/۵۶ | ۲۰/۵۰     | ۱۴۲/۰۳   | ۲۳۴/۹۴   | ۱/۷۷ | تکاب   |
| ۲۱۱/۶۱     | ۵۵۱/۷۱   | ۶۹۳/۸۹   | ۱/۵۲ | ۱۹/۷۵     | ۹۹/۸۶    | ۱۶۵/۲۸   | ۱/۷۵ | سراب   |
| ۲۸۲/۴۶     | ۴۷۹/۳۷   | ۶۲۳/۷۳   | ۱/۵۷ | ۳۶/۶۰     | ۱۴۴/۳۵   | ۲۳۶/۰۶   | ۱/۸۱ | سلماس  |
| ۲۰۵/۸۸     | ۶۸۷/۰۷   | ۸۸۱/۷۵   | ۱/۵۱ | ۴۳۰۸۵     | ۱۴۶/۹۸   | ۲۳۹/۹۳   | ۱/۷۱ | مراغه  |
| ۲۵۴/۵۹     | ۵۷۰/۳۴   | ۷۱۵/۸۸   | ۱/۵  | ۱۹/۰۷     | ۱۴۸/۸۵   | ۲۴۳/۰۴   | ۱/۷۲ | مهاباد |



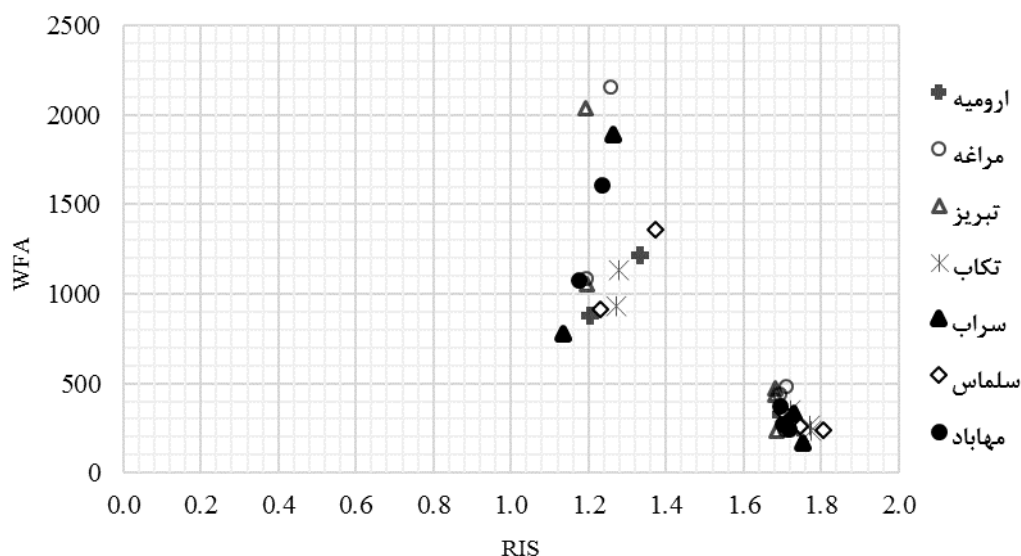


## شکل ۲- روند تغییرات شاخص RIS محصولات مورد بررسی در ایستگاه‌های منتخب.

خود کاهش می‌یابد. زیرا در شرایط کم آبیاری گیاه نمی‌تواند به‌طور عادی به تولید کامل خود ادامه دهد و با کاهش عملکرد جهت مقابله با خشکی روبه‌رو خواهد بود. اما با آبیاری، میزان محصول، به‌صورت یک تابع درجه دوم با افزایش آب، زیاد می‌شود و این روند تا مرحله‌ای که آب داده شده 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 در آمده 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 (مشعل و همکاران) (۱۳۸۷). بنابراین هدف اصلی باید بر افزایش تولید محصول به‌ازای آب مصرفی و استفاده بهینه از منابع آب موجود متمرکز باشد. در این تحقیق به‌منظور ارزیابی وضعیت محصولات تولیدی از نظر آبیاری و آب مصرفی به‌ازای محصول تولیدی و عملکرد، نمودار شاخص RIS در مقابل تغییرات ردپای آب آبی محصولات رسم گردید (شکل ۳). در نمودار فوق هرچه مقادیر مربوط به شاخص RIS نزدیک به عدد ۱ و کمتر از آن باشد و در مقابل ردپای آب محصول نیز رقم کمتری را به‌ازای محصول تولیدی نشان دهد، وضعیت گیاه مورد نظر مطلوب‌تر و بهینه‌تر خواهد بود.

شکل ۲ نشان می‌دهد که یونجه و گندم، از نظر شاخص RIS مقادیری کمتری نسبت به سایر محصولات دارند، که این به دلیل طولانی بودن دوره رشد و تأمین بیشتر آب ناشی از بارندگی بوده است. مقادیر شاخص نسبی تأمین آب آبیاری ایستگاه سراب نسبت به سایر ایستگاه‌ها مقدار کمتری را در محاسبات مکانی نشان می‌دهد این در حالی است که مقدار این شاخص در ایستگاه سلماس برای تمامی محصولات بیشترین مقدار بوده که تفاوت مقادیر شاخص RIS بیانگر اختلاف در میزان بارندگی، نحوه کشت و زرع و تکنولوژی سیستم آبیاری می‌باشد.

در تعیین شاخص بهره‌وری آب از تابع عملکرد استفاده می‌گردد که این تابع رابطه بین محصول قابل فروش در مقابل آب مصرفی را نشان می‌دهد. با توجه به تحقیقات انجام‌گرفته روی محصولات مختلف مشخص شده است که علت تغییرات عملکرد، تابع تولید به شکل سهمی بوده است (سپاسخواه و همکاران) (۱۳۸۵). به‌طوری 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 (کم آبیاری)، عملکرد محصول از مقدار نهایی

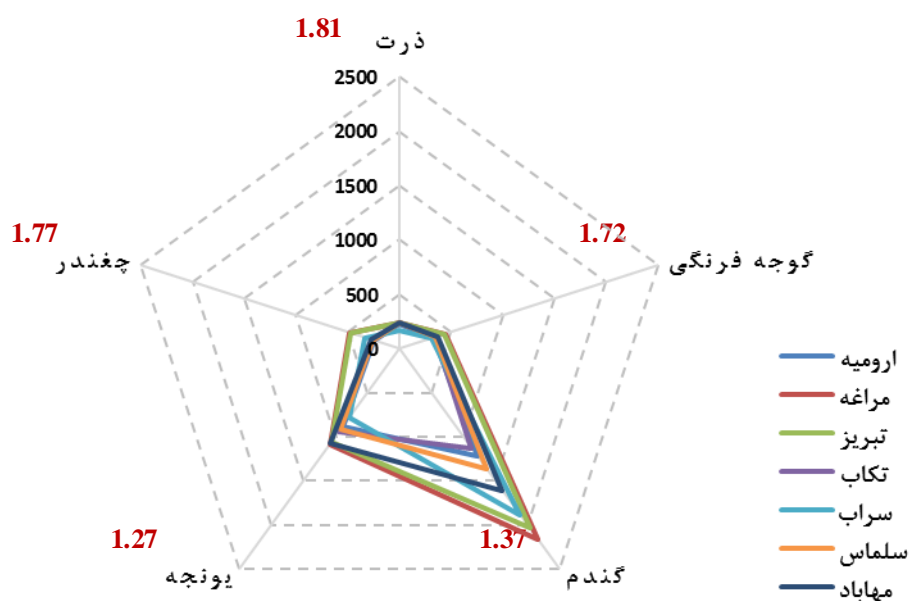


### شکل ۳- رابطه بین وضعیت آبیاری و ردپای آب محصولات مورد بررسی در حوضه دریاچه ارومیه.

از شاخص‌های ذکر شده در بین محصولات مورد بررسی روند مشخصی را در تمامی ایستگاه‌ها نشان می‌دهند. در بین محصولات مورد بررسی، گندم و یونجه بیشترین مقدار ردپای آب را دارند، درحالی‌که مقادیر شاخص RIS آن‌ها کمتر از سایر محصولات به دست آمده است. بالا بردن راندمان استفاده از آب در سیستم‌های آبیاری باعث کم شدن مقدار تأمین نسبی آب آبیاری (RIS) (آبیاری کافی)، افزایش مقدار عملکرد محصول و کاهش ردپای آب می‌گردد که در نهایت تلفات آب مازاد در حین فرآیند تولید محصول و خارج ساختن آن از مناطق کم آب حوضه با صادرات محصولات گردد. گارسیا موریلو و همکاران (۲۰۱۵) در مطالعه‌ای مشابه روی محصول توت‌فرنگی در اسپانیا مقادیر RIS و مقادیر ردپای آب در بخش‌های مختلف را مورد ارزیابی قرار داده‌اند و عوامل زمان کشت محصول و راندمان آبیاری و سیستم تکنولوژی آبیاری را به‌عنوان عوامل اصلی در شاخص تأمین نسبی آب آبیاری بیان نموده‌اند.

با توجه به شکل ۳، در محصولاتی که مقدار شاخص RIS در آن‌ها بیشتر است (بیش‌آبیاری)، مقدار ردپای آب کمتر (عملکرد بیشتر به ازای آب مصرفی) و در محصولاتی که ردپای آب بیشتر (عملکرد کمتر نسبت به آب مصرفی) دارند، مقدار شاخص RIS کمتر (مصرف کمتر آب) و نزدیک به عدد ۱ می‌باشد. بنابراین در یک جمع‌بندی کلی می‌توان گفت که وضعیت کشاورزی برای محصولات مورد بررسی در حوضه دریاچه ارومیه مطلوب نبوده و نیاز به بازنگری‌های اساسی در سیاست‌های کلان کشاورزی، الگوی کشت، تجهیزات آبیاری و الگوی مصرفی مردم از محصولات کشاورزی با ردپای آب کمتر در این مناطق در جهت افزایش بهره‌وری محصولات و حفظ منابع آبی می‌باشد. به‌منظور ارزیابی کل محصولات، ردپای آب و شاخص RIS آن‌ها به‌طور جداگانه برای تمامی ایستگاه‌ها مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۴). در شکل ۴ اعداد قرمز رنگ مقادیر شاخص RIS و اعداد سیاه رنگ مقادیر مربوط به شاخص ردپای آب محصولات را نشان می‌دهند.

با توجه به شکل ۴ علیرغم وجود مقادیر متفاوتی از ردپای آب و شاخص RIS، تغییرات هر یک



#### شکل ۴- وضعیت ردپای آب و شاخص RIS محصولات مورد بررسی در ایستگاه‌های منتخب.

محاسبه گردید. نتایج ضمن تاکید بر بالا بودن تاثیر راندمان آبیاری در افزایش میزان ردپای آب آبی محصولات، نشان‌دهنده بالا بودن میزان آبی در دشت‌های شرقی حوضه و همچنین بالا بودن میزان آب سبز در دشت‌های غربی و جنوبی حوضه می‌باشد. دلیل این تفاوت بیشتر بودن بارندگی در قسمت‌های غربی و جنوبی حوضه نسبت به قسمت‌های شرقی آن می‌باشد. در بین محصولات مورد بررسی نیز گندم و یونجه بیشترین ردپای آب مصرفی را به خود اختصاص می‌دهند که این به دلیل پایین بودن میزان عملکرد در واحد سطح این محصولات نسبت به سایر محصولات تولیدی نظیر چغندر قند، گوجه فرنگی و ذرت می‌باشد. مقادیر شاخص تامین نسبت آب آبیاری (RIS) نیز، برای تمامی ایستگاه‌های مورد بررسی وضعیت بیش آبیاری را نشان می‌دهد، که این به دلیل پایین بودن راندمان و تلفات شدید آب در حین آبیاری می‌باشد. جمع‌بندی نتایج حاکی از نامطلوب بودن شرایط کشاورزی در منطقه بوده به طوریکه محصولات مورد بررسی که عمده محصولات مورد کشت در حوضه دریاچه ارومیه می‌باشند، یا آب بیشتری مصرف می‌نمایند و یا عملکرد کمتری نسبت به آب آبیاری مصرف شده دارند.

توصیه می‌شود با برنامه‌ریزی‌های کلان و صحیح در بخش کشاورزی و تولید محصولات، ضمن استفاده از پتانسیل‌های محیطی و اقلیمی منطقه به حفظ و ذخیره منابع ارزشمند آبی تلاش کرد تا شاهد توسعه‌ای سبز و پایدار در منطقه و کشور باشیم.

نتایج حاکی از نامطلوب بودن شرایط کشاورزی در منطقه بوده به‌طوریکه محصولات مورد بررسی که عمده محصولات مورد کشت در حوضه دریاچه ارومیه می‌باشند، یا آب بیشتری مصرف می‌نمایند و یا عملکرد کمتری نسبت به آب آبیاری مصرف شده دارند. توصیه می‌شود با برنامه‌ریزی‌های کلان و صحیح در بخش کشاورزی و تولید محصولات، ضمن استفاده از پتانسیل‌های محیطی و اقلیمی منطقه به حفظ و ذخیره منابع ارزشمند آبی تلاش کرد تا شاهد توسعه‌ای سبز و پایدار در منطقه و کشور باشیم.

#### نتیجه‌گیری کلی

میزان آب مصرفی پایه و ردپای آب هر محصول در هر منطقه تحت تاثیر اقلیم آن منطقه، میزان تولیدات، الگوی مصرفی مردم، عملیات کشاورزی و راندمان کاربرد آب در آن منطقه متغیر است، لذا نیاز به مفاهیمی است که بتوان با آن نیاز واقعی هر محصول را به حساب آورد و بهترین الگوی کشت و تولیدی را در سیاست کار خود به منظور حفظ منابع آبی و افزایش بهره‌وری محصولات داشت. در این تحقیق به منظور ارزیابی وضعیت محصولات تولیدی از نظر آبیاری و آب مصرفی به ازای محصول تولیدی و عملکرد، از شاخص‌های تامین نسبی آب آبیاری (RIS) و ردپای آب (WF) استفاده گردید. ردپای آب محصولات در دو جزء آب آبی (WF blue) و آب سبز (WF green) محاسبه شده سپس به منظور اعمال تاثیر راندمان آبیاری در محاسبه میزان آب مصرفی محصولات رد پای آب آبی واقعی (WFA blue) نیز

#### منابع مورد استفاده

- Maknon R and Sohrabi H, 2011. Introducing the Water Footprint from Concepts to Applications, Pages 1-10. Proceedings of the 4th Iranian Water Resources Management Conference, 14-13 May, Amir Kabir University of Technology, Tehran.
- Mashaal M. Varavipour M. Sadat Noori 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.

- Mohammadi Y, Shaban ali Fami A and Assadi A, 2009. Evaluation of Farmers' Skills on the Application of Agricultural Water Management Technologies in Zarindesh County, Fars Province. *Journal of Agricultural Extension and Education* 5(1): 1-10.
- Sepaskhah A, Tavakoli A. and Mousavi S, 2006. Principles and Applications of Low Irrigation. Publication of Iran's National Irrigation and Drainage Committee.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D and Smith M, 1998. Crop Evapotranspiration (Guidelines for Computing Crop Water Requirements). FAO Irrigation and Drainage, Paper, No. 56. FAO. Rome.
- Chapagain AKB and Hoekstra AY, 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.
- 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). *Ecological Indicators* 40: 43-50.
- 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.
- Hoekstra AY, 2002. Virtual water trade. Pp. 1-14. Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade. 12-13 December, Delft, Netherlands.
- Hoekstra AY and Chapagain AK, 2007. Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resources Management* 21: 35-48.
- Hoekstra AY and Hung PQ, 2002. Virtual water trade .Pp. 72-86. Proceedings of quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. 15 February, Delft, Netherlands.
- Hoekstra AY and Hung PQ, 2005. Globalization of water resources: International virtual water flows in relation to crop trade. *Global Environmental Change* 15:45-56.
- Jefferies D, Munoz I, Hoedjes J, King VJ, Aldaya MM, Ercin AE, Mila I, Canals LL and Hoekstra AY, 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.
- 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.
- Morillo JG, Díaz JAR, 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.
- Rodríguez-Díaz JA, Camacho-Poyato E, Lopez-Luque R and Perez-Urrestarazu L, 2008. Benchmarking and multivariate data analysis techniques for improving the efficiency of irrigation districts (an application in Spain). *Agricultural Systems* 96: 250-259.
- Rodriguez CI, de Galarreta VR and Kruse EE, 2015. Analysis of water footprint of potato production in the Pampean region of Argentina. *Cleaner Production* 81: 182-190.