

ارزیابی تغییرات ردپای آب محصولات زراعی حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از روش LMDI

مجید منتصری*، نگار رسولی مجد^۲، جواد بهمنش^۱، حسین رضایی^۱

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۲/۰۷ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۴/۱۳

۱- دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه ارومیه

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: montaseri@hotmail.com

چکیده

شاخص‌های مؤثری مانند ردپای آب لازم است در تخصیص بهینه منابع آب مدنظر قرار گیرند. در این مطالعه از شاخص ردپای آب با در نظر گرفتن مصارف مستقیم و غیرمستقیم آب در سه بخش منابع آب آبی، سبز و خاکستری، به منظور برآورد میزان کل آب مصرفی توسط محصولات زراعی در حوضه دریاچه ارومیه استفاده گردید. جهت تحلیل جداگانه عوامل مؤثر در روند تغییرات ردپای آب، روش LMDI (شاخص لگاریتم میانگین انحرافات) به کار گرفته شد. این شاخص مجموع وزنی نرخ تغییرات نسبی پارامترهای مؤثر را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که علی‌رغم روند کاهشی در هر سه جزء ردپای آب محاسبه شده در طول سال‌های مورد بررسی (۲۰۱۰-۲۰۰۳)، تغییرات نامنظمی در میزان هر جزء سه‌گانه ردپای آب در طی دوره مذکور وجود دارد. عامل‌های سیستم‌های آبیاری و نحوه فعالیت‌های کشاورزی در منطقه به عنوان عوامل افزایش‌دهنده و عملکرد گیاه به عنوان عامل کاهش‌دهنده در تغییرات ردپای آب شناخته شدند. بیشترین مقدار ردپای آب کل مربوط به سال ۲۰۰۴ بوده که در آن مقادیر ردپای آب آبی، آب سبز و آب خاکستری به ترتیب ۲۳۴۱۹، ۸۸۳۲ و ۲۴۳۷ مترمکعب بر تن می‌باشد. همچنین کمترین مقدار ردپای آب کل در سال ۲۰۰۶ مشاهده شد و مقادیر ردپای آب آبی، آب سبز و آب خاکستری در این سال به ترتیب ۱۹۰۵۶، ۷۵۶۲ و ۲۰۷۶ مترمکعب بر تن است.

واژه‌های کلیدی: آب آبی، آب خاکستری، آب سبز، حوضه دریاچه ارومیه، ردپای آب

Evaluation of Water Footprint of Crop Production Variability in Lake Urmia Basin using LMDI Method

M Montaseri^{*1}, N Rasouli Majd², J Behmanesh¹, H Rezaie¹

Received: 20 January 2015 Accepted: 3 July 2016

1. Assoc. Prof., Dept. of Water Engineering, Urmia University, Iran

2. MSc student of Water Resources Engineering, Dept. of Water Engineering, Urmia University, Iran

* Corresponding Author, Email: montaseri@hotmail.com

Abstract

The effective indices such as water footprint should be considered in optimal allocation of water resources. In this study, the water footprint index with considering the direct and indirect water consumptions in three components of blue, green and grey water resources was applied to evaluate the total amount of water consumption in crop production of Lake Urmia basin. The LMDI (Logarithmic mean divisia index) approach was applied to determine the impact of the different factors on the variability of water footprint. The LMDI index showed the weighted sum of relative changes in the effective parameters. According to the results, although a reduction trend in the calculated water footprint components during the studied years (2003-2010) was observed, there were some irregular trends and changes in the amount of each component of water footprint at the same period. Irrigation systems and agricultural activities in the region were identified as increasing parameters while crop yield was a decreasing parameter in the water footprint changes. The maximum amount of total water footprint was related to 2004, in which the blue, green and grey water footprint values were 23419, 8832 and 2437 m³ ton⁻¹, respectively. Also, the minimum amount of total water footprint was related to 2006, in which the blue, green and grey water footprint values were 19056, 7562 and 2076 m³ ton⁻¹, respectively.

Keywords: Blue water, Green water, Grey water, Lake Urmia basin, Water Footprint

مقدمه

تغییر در الگوی شهرنشینی و روستا نشینی و غیره اشاره کرد (آقاچوچک و همکاران ۲۰۱۵). بنابراین ضرورت استفاده و تخصیص بهینه منابع آب و مطالعه دقیقتر نقش عوامل تأثیرگذار در مقدار کمی و کیفی آن امری بدیهی است. در این میان استفاده از شاخص‌ها و معیارهای جدید، مسیر حرکت در جهت برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه و پایدار منابع آب را هموارتر می‌سازد.

حوضه دریاچه ارومیه، یکی از مهمترین حوضه‌های ایران در شمال غرب کشور بوده که به دلیل آب و هوای مساعد و همچنین وجود دریاچه ارومیه اکوسیستمی مناسب برای کشت و زرع محصولات کشاورزی می‌باشد. با این وجود مطالعات انجام شده آشکار ساخته است که خطرهای جدی اکوسیستم دریاچه و حوضه آبریز آن را تهدید می‌کند (آقاچوچک و همکاران ۲۰۱۵). از جمله این عوامل می‌توان به افزایش سطح زیرکشت، تغییر اقلیم، الگوی نامناسب کشت، پایین بودن راندمان آب و عملکرد محصول، افزایش جمعیت،

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. چاپاگین و همکاران (۲۰۰۶) به بررسی ردپای آب مصرفی پنبه در سراسر جهان پرداختند. آنها در تحقیق خود تبخیر آب باران نفوذ یافته برای رشد پنبه (آب سبز مصرفی)، خروج آب سطحی یا آب زیرزمینی برای آبیاری (آب آبی مصرفی) و آلودگی آب در طول دوره رشد پنبه در سراسر جهان را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد در دوره آماری (۲۰۰۱ - ۱۹۹۷) محصول پنبه به ۲۵۶ میلیارد متر مکعب آب در هر سال نیاز دارد که ۴۲٪ آب آبی، ۳۹٪ آب سبز و ۱۹٪ آب خاکستری است. چاپاگین و هواکسترا (۲۰۱۱) به ارزیابی جهانی ردپای آب برنج با استفاده از داده‌های محلی و آبیاری واقعی پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که ردپای جهانی آب برای برنج ۷۸۴ کیلومترمکعب بر سال با متوسط ۱۳۲۵ مترمکعب بر تن می‌باشد که ۴۸٪ آن مربوط به آب سبز، ۴۴٪ آب آبی و ۸٪ آب خاکستری است. وان اول و همکاران (۲۰۰۹) به بررسی ردپای آب خارجی و داخلی هلند پرداختند. سرانه ردپای کل آب هلند به‌طور متوسط ۲۳۰۰ مترمکعب بر سال می‌باشد که ۶۷٪ آن به مصرف محصولات کشاورزی، ۳۱٪ به مصرف کالاهای صنعتی و ۲٪ به مصرف آب خانگی رسیده است. ژانگ و همکاران (۲۰۱۲) در تحقیقی به بررسی ردپای آب سبز و آبی و ادغام آن با ردپای آب محیط زیست و ردپای آب زیرزمینی در اسپانیا پرداختند. در یک سال نرمال، میزان ردپای آب سبز برای کشاورزی و مراتع ۱۹۰ میلی‌متر از مجموع ۴۱۰ میلی‌متر آب سبز کل محاسبه گردیده است. مقدار آب آبی نیز ۵۰٪ آب آبی کل به‌دست آمد. همچنین در بازه زمانی ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۸، ۸۶٪ ردپای آب مربوط به سفره آب

شاخص ردپای آب^۱، به‌عنوان یک شاخص جامع و جدید در بحث مدیریت پایدار منابع آب، نشان‌دهنده مقدار مصرف آب و آثار آب مصرفی در تولید محصولات و ارائه خدمات بوده که توسط هواکسترا در سال ۲۰۰۲ معرفی گردیده است. مفهوم ردپای آب، آب مصرفی مستقیم و غیرمستقیم یک تولیدکننده یا یک مصرف‌کننده را نشان می‌دهد (هواکسترا و هانگ ۲۰۰۲). ردپای آب کل از سه بخش تشکیل شده است: مصارف ناشی از آب‌های سطحی و زیرزمینی، آب مصرفی از باران که به‌صورت رطوبت در پروفیل خاک ذخیره شده و حجم آب شیرین که برای رفع آلودگی آب مورد نیاز است که به‌ترتیب آب آبی^۲، آب سبز^۳ و آب خاکستری^۴ تعریف می‌شوند (هواکسترا ۲۰۰۷). ردپای آب هر محصول به‌صورت نسبت کل آب مورد استفاده در سطح مزرعه (مترمکعب) به میزان تولید همان محصول (تن) محاسبه می‌شود که نشان‌دهنده شدت آب مصرفی محصولات مختلف می‌باشد (هواکسترا و چاپاگین ۲۰۰۷). شاخص ردپای آب در سال‌های اخیر به‌طور گسترده‌ای توسط متخصصان برای ارزیابی عملکرد بسیاری از محصولات از جمله پنبه، گندم، ذرت، سیب‌زمینی و برنج در نقاط مختلف دنیا مورد استفاده قرار گرفته است که از آن جمله می‌توان به تحقیقات روست و همکاران (۲۰۰۸)، یو و همکاران (۲۰۱۰)، فنگ و همکاران (۲۰۱۲)، گرینز لینز و همکاران (۲۰۱۳)، هراث و همکاران (۲۰۱۴) و وانگ و همکاران (۲۰۱۵) اشاره کرد. هواکسترا و هانگ (۲۰۰۵)، ردپای آب کشورهای مختلف از جمله ایران را برای دوره (۱۹۹۹-۱۹۹۵) برآورد نموده‌اند. مطابق تحقیقات آنها، کشورهای بلژیک و هلند ردپای آب بالایی حدود ۲۰۰۰ متر مکعب در سال به‌ازاء هر نفر دارند. متوسط ردپای آب معادل ۱۰۰۰ مترمکعب در سال به‌ازاء هر نفر بوده که متعلق به کشورهای ژاپن، مکزیک و آمریکا می‌باشد. کمینه ردپای آب در حدود ۵۰۰ متر مکعب در سال

³ Green water footprint

⁴ Grey water footprint

¹ Water footprint

² Blue water footprint

معرفی گردیده است. اما از آنجا که عوامل تأثیرگذار متعددی در میزان کمیت آن نقش به‌سزایی دارند، ضرورت بررسی روند تغییرات آن و بررسی تأثیر هر یک از عوامل به‌ویژه در مناطقی مانند حوضه آبریز دریاچه ارومیه که با بحران شدید تخصیص بهینه آب مواجه بوده و تاکنون مطالعاتی در این زمینه برای این حوضه آبریز صورت نگرفته است، امری بدیهی می‌باشد. هدف از این تحقیق، مطالعه روند تغییرات ردپای آب محصولات غالب مورد کشت در حوضه آبریز دریاچه ارومیه در طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ و بررسی نقش عوامل مؤثر شامل جمعیت، شهرنشینی، الگوی کشت و نحوه فعالیت‌های کشاورزی، سیستم‌ها و تکنولوژی‌های آبیاری و سطح زیرکشت، به‌منظور برنامه‌ریزی صحیح و ارائه الگوی مناسب در جهت کاهش ردپای آب و حفظ منابع آبی در راستای توسعه پایدار در حوضه آبریز مورد مطالعه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه، محصولات و داده‌ها

حوضه آبریز دریاچه ارومیه به‌عنوان یکی از حوضه‌های آبریز شش‌گانه اصلی ایران، در شمال غرب کشور ایران واقع شده و مساحتی معادل ۳/۲٪ مساحت کل کشور را در برمی‌گیرد. دریاچه ارومیه به‌دلیل عوامل متعددی از جمله افزایش جمعیت و توسعه اراضی زیر کشت که منجر به افزایش مصرف آب گردیده، در معرض خشکی قرار گرفته که این پدیده باعث برهم خوردن تعادل اکوسیستمی منطقه شده و ضرورت انجام مطالعاتی جهت ارزیابی عوامل تأثیرگذار را ایجاب می‌نماید. در این تحقیق برای بررسی ردپای آب محصولات زراعی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، ایستگاه‌های سینوپتیک سلماس، ارومیه، مهاباد، تکاب، تبریز، مراغه و سراب به‌عنوان ایستگاه‌های مبنا با توزیع

زیرزمینی توسط آب سطحی تأمین شده است. رودریگز و همکاران (۲۰۱۵) در بررسی ردپای آب تولیدات سیب‌زمینی در آرژانتین، کل ردپای آب سیب‌زمینی را ۲۲۴ مترمکعب بر تن بیان کردند که از این مقدار سهم ردپای آب آبی و آب سبز به‌ترتیب ۵۶/۴٪ و ۲۴/۱٪ می‌باشد. آنها به‌منظور کاهش ردپای آب این محصول عوامل مختلفی نظیر، استفاده از تکنولوژی‌های جدید و پیشرفته در آبیاری، افزایش دانش کاری کشاورزان و اصلاح قیمت آب و قانون استفاده از آب‌های زیرزمینی را پیشنهاد کردند. مکنون و هواکسترا (۲۰۱۴) ضمن بیان اینکه کاهش ۲۵٪ ردپای آب محصولات در دنیا باعث ذخیره ۳۹٪ آب مصرفی می‌شود، دو عامل مهم الف: استفاده از تکنولوژی‌های خاص در کشاورزی و ب: نحوه کشت و زرع یا فعالیت‌های کشاورزی را به‌عنوان معیارهای اصلی در میزان ردپای آب محصولات تولیدی در هر منطقه و کاهش آن معرفی کردند. ژو و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی روند تغییرات ردپای آب محصولات مختلف در طی سال‌های ۱۹۷۸ تا ۲۰۱۲ در پکن پرداختند و بعد از مشخص شدن ردپای آب محصولات، تأثیر عوامل مؤثر در ردپای آب محصولات را با استفاده از روش LMDI^۵ مورد مطالعه قرار دادند. آنها در این مطالعه با بررسی پنج عامل الف: ذخیره آب و کاهش آب آبیاری مصرفی با استفاده از تکنولوژی‌های جدید آبیاری، ب: نحوه کشت و زرع و فعالیت‌های کشاورزی، ج: سطح کشت و تولید محصولات، د: شهرنشینی و ه: جمعیت، سه عامل شهرنشینی، تغییر ساختار کشاورزی و استفاده از تکنولوژی‌های جدید در آبیاری را به‌عنوان عوامل مهم در کاهش ۳۵/۱٪ ردپای آب محصولات در طی دوره مورد مطالعه دانستند.

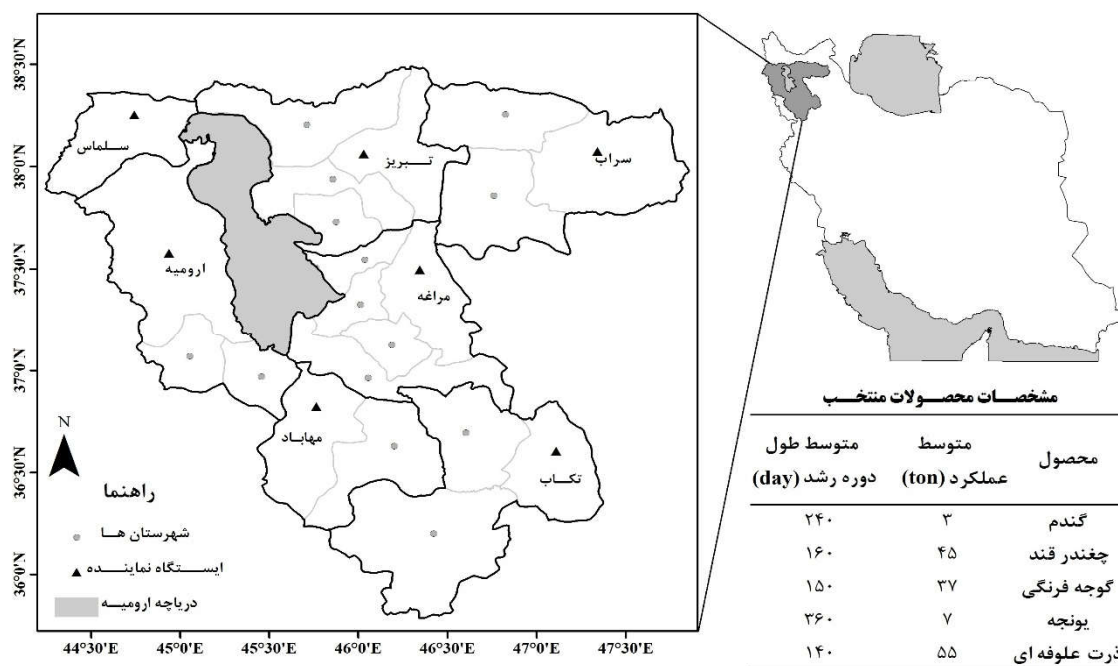
شاخص ردپای آب به‌عنوان یک مفهوم جدید در بحث تخصیص بهینه منابع آب و مدیریت پایدار آن

^۵ Logarithmic mean divisia index

داده‌های مورد نیاز شامل دمای کمینه، دمای بیشینه، درصد رطوبت نسبی، ساعت آفتابی، سرعت باد و بارندگی در مقیاس ماهانه از سازمان هواشناسی کشور تهیه و پس از مرتب‌سازی به نرم‌افزار معرفی گردید. داده‌های مربوط به مشخصات گیاهی شامل طول دوره رشد، ارتفاع گیاه، عملکرد محصولات، عمق ریشه و ضریب گیاهی از آمارنامه‌های کشاورزی، سند ملی کشور و آمارنامه‌های سازمان خوار و بار جهانی (بی‌نام 2010a,b) استخراج گردید. همچنین سالنامه‌های آماری مرکز آمار ایران به منظور تخمین آمار جمعیتی حوضه دریاچه ارومیه و هریک از ایستگاه‌های منتخب مورد استفاده قرار گرفت.

تقریباً یکنواخت در تمامی سطح حوضه آبریز و براساس خصوصیات مشترک منابع آب، جغرافیایی و محصولات تولیدی انتخاب شدند. همچنین در این مطالعه، پنج محصول زراعی گندم، چغندر قند، گوجه فرنگی، یونجه و ذرت علوفه‌ای به‌عنوان گیاه‌های شاهد با سطح کشت غالب از گروه محصولات زراعی غلات، سبزیجات، صنعتی و علوفه انتخاب و تعیین شده‌اند. محصولات مذکور به‌طور مشترک در تمامی دشت‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه کشت و دارای طول دوره رشد و نیاز آبی متفاوت می‌باشند. شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های منتخب را نشان می‌دهد.

در این مطالعه به منظور محاسبه تبخیر و تعرق و نیاز آبی گیاهان از نرم‌افزار CropWat 8.0 استفاده گردید.



شکل ۱- تقسیم‌بندی حوضه آبریز و موقعیت ایستگاه‌های منتخب.

$$WF_i = WF_{i \text{ green}} + WF_{i \text{ blue}} + WF_{i \text{ grey}} \quad [1]$$

که در آن WF_i ، ردپای آب کل (مترمکعب بر سال) محصول i می‌باشد. WF_{blue} ردپای آبی است که برای

محاسبات ردپای آب

ردپای آب یک محصول از حاصل جمع سه جزء آبی، آب سبز و آب خاکستری به دست می‌آید (رابطه ۱) (هواکسترا و همکاران ۲۰۱۱).

شود. لازم به ذکر است آلاینده‌ها به‌طورکلی از آلودگی-های نیتروژن، فسفر و غیره و همچنین آفت کش‌ها و حشره‌کش‌ها ایجاد می‌شوند.

اجزاء مصرف آب محصول (CWU) سبز و آبی نیز از مجموع تبخیر و تعرق روزانه در تمام دوره رشد یک گیاه به‌صورت رابطه‌های ۶ و ۷ محاسبه می‌گردند (هواکسترا و همکاران ۲۰۱۱).

$$CWU_{green} = 10 * \sum_{d=1}^{l_{gp}} ET_{green} \quad [6]$$

$$CWU_{blue} = 10 * \sum_{d=1}^{l_{gp}} ET_{blue} \quad [7]$$

که در آن ET_{green} نشان‌دهنده تبخیر و تعرق آب سبز (میلی‌متر بر سال) و ET_{blue} نشان‌دهنده تبخیر و تعرق آب آبی (میلی‌متر بر سال) می‌باشد. عدد ۱۰ نیز به‌منظور تبدیل عمق آب در میلی‌متر به حجم آب در سطح زمین (مترمکعب بر هکتار) می‌باشد. در روابط ۶ و ۷ l_{gp} طول دوره رشد در واحد روز است. بدین‌ترتیب منظور از مجموع داده‌های تبخیر و تعرق در طول دوره رشد یعنی محاسبه مجموع تبخیر و تعرق روزانه گیاه از روز اول کاشت گیاه تا روز برداشت آن می‌باشد. به‌منظور محاسبه تبخیر و تعرق روزانه نیز از رابطه پیشنهادی آلن و همکاران مطابق رابطه ۸ استفاده گردید (آلن و همکاران ۱۹۹۸).

$$ET = K_s[t] * K_c[t] * ET_o[t] \quad [8]$$

که در آن $K_c[t]$ ، ضریب گیاهی و $K_s[t]$ ضریب تنش آب که وابسته به آب قابل دسترس در خاک می‌باشد. $ET_o[t]$ نیز تبخیر و تعرق مرجع می‌باشد. $K_s[t]$ بر اساس تابع روزانه بیشینه مقدار واقعی رطوبت قابل دسترس در ناحیه ریشه خاک قابل محاسبه است (رابطه ۹).

$$K_s[t] = \begin{cases} \frac{S[t]}{(1-p) * S_{max}[t]}, & S[t] < (1-p) * S_{max}[t] \\ 1, & \text{other wise} \end{cases} \quad [9]$$

آب‌های مورد استفاده از منابع سطحی و زیرزمینی محاسبه می‌گردد. WF_{green} ، ردپای آب سبز می‌باشد که شامل حجمی از آب باران مؤثر است که به‌صورت رطوبت در خاک ذخیره می‌شود. WF_{grey} به‌عنوان آب خاکستری تعریف می‌شود و به حجم آبی اطلاق می‌گردد که برای از بین بردن آلودگی‌های ایجاد شده ناشی از کشت گیاه در محیط، مورد استفاده قرار می‌گیرد (هواکسترا و همکاران ۲۰۱۱).

معمولا برای بیان روند ردپای آب در بخش کشاورزی از واحد حجم آب در وزن محصول (مترمکعب بر تن) یا لیتر بر کیلوگرم برای WF ها استفاده می‌شود. برای این منظور از حاصل تقسیم مقدار ردپای آب هر محصول (مترمکعب بر سال) بر مقدار عملکرد آن (تن بر سال) استفاده می‌گردد (رابطه ۲) (هواکسترا و همکاران ۲۰۱۱).

$$WF = WF_i / Y \quad [2]$$

ردپای آب هر جز نیز طبق روابط ۳ تا ۵ به‌دست می‌آید (هواکسترا و همکاران ۲۰۱۱):

$$WF_{i green} = \frac{CWU_{green}}{Y} \quad [3]$$

$$WF_{i blue} = \frac{CWU_{blue}}{Y} \quad [4]$$

$$WF_{i grey} = \frac{(\alpha * AR)(C_{max} - C_{nat})}{Y} \quad [5]$$

که در روابط فوق CWU_{green} و CWU_{blue} ، به‌ترتیب جز آب سبز و جزء آب آبی محصول (میلی‌متر بر سال) و Y عملکرد گیاهان زراعی (تن بر سال) می‌باشد. مقدار جزء خاکستری ردپای آب ($WF_{proc/grey}$) نیز توسط مقدار مواد شیمیایی مورد استفاده در هر هکتار از زمین زراعی (AR)، کسر آبشویی (α) و بیشینه غلظت قابل قبول مواد (C_{max}) و غلظت طبیعی مواد آلوده‌کننده (C_{nat}) و در نهایت عملکرد محصول (Y) به‌صورت رابطه ۵ محاسبه می‌

تغییرات ردپای آب مربوط به گسترش شهرنشینی و تغییرات ردپای آب مربوط به جمعیت می‌باشند. نحوه محاسبه تغییرات هر یک از پارامترهای فوق به صورت روابط ۱۱ تا ۱۵ می‌باشد (ژو و همکاران ۲۰۱۵).

$$\Delta W_{F_I} = \sum_i \frac{WF_i^t - WF_i^0}{\ln(WF_i^t) - \ln(WF_i^0)} \times \ln\left(\frac{I_i^t}{I_i^0}\right) \quad [11]$$

$$\Delta W_{F_S} = \sum_i \frac{WF_i^t - WF_i^0}{\ln(WF_i^t) - \ln(WF_i^0)} \times \ln\left(\frac{S_i^t}{S_i^0}\right) \quad [12]$$

$$\Delta W_{F_Y} = \sum_i \frac{WF_i^t - WF_i^0}{\ln(WF_i^t) - \ln(WF_i^0)} \times \ln\left(\frac{Y_i^t}{Y_i^0}\right) \quad [13]$$

$$\Delta W_{F_U} = \sum_i \frac{WF_i^t - WF_i^0}{\ln(WF_i^t) - \ln(WF_i^0)} \times \ln\left(\frac{U_i^t}{U_i^0}\right) \quad [14]$$

$$\Delta W_{F_P} = \sum_i \frac{WF_i^t - WF_i^0}{\ln(WF_i^t) - \ln(WF_i^0)} \times \ln\left(\frac{P_i^t}{P_i^0}\right) \quad [15]$$

در روابط فوق، اندیس‌های ۰ و ۱ به ترتیب نشان‌دهنده مقدار پارامتر در سال قبل و سال مورد نظر می‌باشد. همچنین پارامترهای I، S، Y، U و P به ترتیب نسبت تغییرات سیستم‌های آبیاری، ساختار کشت، عملکرد محصول در واحد سطح تولیدی، گسترش شهرنشینی و جمعیت می‌باشند که به صورت روابط ۱۶ تا ۱۹ محاسبه می‌گردند (ژو و همکاران ۲۰۱۵).

$$I = \left(\frac{WF_i}{Y_i}\right) \quad [16]$$

$$S = \left(\frac{Y_i}{Y_a}\right) \quad [17]$$

$$Y = \left(\frac{Y_a}{P_a}\right) \quad [18]$$

$$U = \left(\frac{P_a}{P}\right) \quad [19]$$

که در این روابط WF_i ، ردپای آب کل محصول i برحسب مترمکعب بر تن؛ Y_i عملکرد سالانه محصول i برحسب تن؛ Y_a عملکرد کل محصول برحسب تن؛ P_a جمعیت

در رابطه ۹، $S_{max}[t]$ بیشینه رطوبت قابل دسترس در ناحیه ریشه خاک در حالت ظرفیت زراعی زمین می‌باشد. همچنین p کسری از S_{max} است که در آن یک محصول می‌تواند آب مورد نیاز خود را بدون تنش از منطقه ریشه جذب نماید. تبخیر و تعرق مرجع (ET_o) یک منطقه را می‌توان با اندازه‌گیری مستقیم و یا با تخمین با استفاده از یک مدل یا رابطه تجربی محاسبه نمود. از آنجاکه اندازه‌گیری مستقیم تبخیر و تعرق کاری پرهزینه و وقت‌گیر می‌باشد، در بیشتر موارد از روش‌های غیر مستقیم استفاده می‌شود. در این تحقیق روش فائو-پنمن-مونتیث به عنوان روش مبنا انتخاب گردید.

تحلیل تغییرات ردپای آب

به منظور تحلیل تغییرات ردپای آب محصولات و بررسی تأثیر عوامل مؤثر بر روند تغییرات آن، روش LMDI (شاخص لگاریتم میانگین انحرافات) استفاده گردید. روش LMDI مجموع وزنی نرخ تغییرات نسبی پارامترهای ارائه شده را نشان می‌دهد. به عبارت بهتر این روش مقدار تغییرات وارد شده به سیستم را توسط هر یک از پارامترهای مورد بررسی نشان می‌دهد. وزن کلی تابع در این روش به وسیله میانگین وزن داده‌های ورودی تابع تعیین شده و سپس تأثیر هر یک از پارامترها نسبت به وزن کلی تابع مورد سنجش قرار می‌گیرد. نحوه محاسبه تابع تغییرات پارامترهای مورد بررسی در تحلیل روند ردپای آب محصولات طبق رابطه ۱۰ ارائه شده است (ژو و همکاران ۲۰۱۵).

$$\Delta W_{F_{tot}} = \Delta W_{F_I} + \Delta W_{F_S} + \Delta W_{F_Y} + \Delta W_{F_U} + \Delta W_{F_P} \quad [10]$$

در رابطه فوق، $\Delta W_{F_{tot}}$ ، ΔW_{F_I} ، ΔW_{F_S} ، ΔW_{F_Y} ، ΔW_{F_U} و ΔW_{F_P} به ترتیب تغییرات ردپای آب کل، تغییرات ردپای آب مربوط به سیستم‌های آبیاری، تغییرات ردپای آب مربوط به ساختار و نحوه کشت و زرع، تغییرات ردپای آب مربوط به عملکرد محصولات در واحد سطح تولیدی،

محصولات در سه جزء آب آبی، آب سبز و آب خاکستری برای دوره (۲۰۱۰-۲۰۰۳) محاسبه گردید (شکل-۳). علی‌رغم شیب کلی کاهشی در هر سه جزء ردپای آب محاسبه شده در طی سال‌های مورد بررسی، تغییرات نامنظمی در روند سری داده‌ها دیده می‌شود. با توجه به شکل، بیشترین مقدار ردپای آب کل مربوط به سال ۲۰۰۴ بوده که در آن مقدار ردپای آب آبی، آب سبز و آب خاکستری در این سال به ترتیب ۲۳۴۱۹، ۸۸۳۲ و ۲۴۳۷ مترمکعب بر تن می‌باشد. همچنین کمترین مقدار ردپای آب کل در سال ۲۰۰۶ مشاهده می‌شود و مقدار ردپای آب آبی، آب سبز و آب خاکستری در این سال به ترتیب ۱۹۰۵۶، ۷۵۶۲ و ۲۰۷۶ مترمکعب بر تن است. این درحالی است که بیشترین مقدار ردپای آب آبی، آب سبز و آب خاکستری به ترتیب در سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۰۴ و ۲۰۰۹ و کمترین آنها به ترتیب در سال‌های ۲۰۰۶، ۲۰۰۸ و ۲۰۰۳ رخ داده است.

به‌منظور بررسی علت تغییرات، تأثیر هر یک از عوامل مؤثر در تغییرات ردپای آب محاسبه شد. جدول ۱ نتایج کلی مقدار تغییرات در ردپای آب کل را برای سال‌های مورد نظر در هر یک از ایستگاه‌های مورد مطالعه به‌صورت جداگانه نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۱، در طی سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۰۳ دو عامل سیستم-های آبیاری و نحوه کشت و زرع بیشترین تأثیر را در تغییرات ردپای آب (تأثیر افزایشی) و عامل شهرنشینی، کمترین تأثیر را در تغییرات ردپای آب داشته است. همچنین با توجه به جدول فوق در بیشتر سال‌ها و در تمامی ایستگاه‌های مورد بررسی (به‌جز تکاب و سراب)، تأثیر عامل عملکرد به صورت منفی بوده و باعث کاهش مقدار ردپای آب محصولات گردیده است؛ که این امر به‌دلیل رشد و توسعه دانش کشاورزی و افزایش استفاده از تکنولوژی‌های جدید کشاورزی در جهت بالا بردن عملکرد گیاهان در سال‌های اخیر می‌باشد.

ساکن در مناطق روستایی و P جمعیت کل حوضه دریاچه ارومیه بر حسب نفر می‌باشد. با در نظر گرفتن روابط ۱۶ تا ۱۹ و در نظر گرفتن تأثیر هر یک از پارامترهای مؤثر و مورد بررسی، می‌توان ردپای آب کل محصول را به‌صورت رابطه ۲۰ و ۲۱ تعریف کرد (ژو و همکاران ۲۰۱۵).

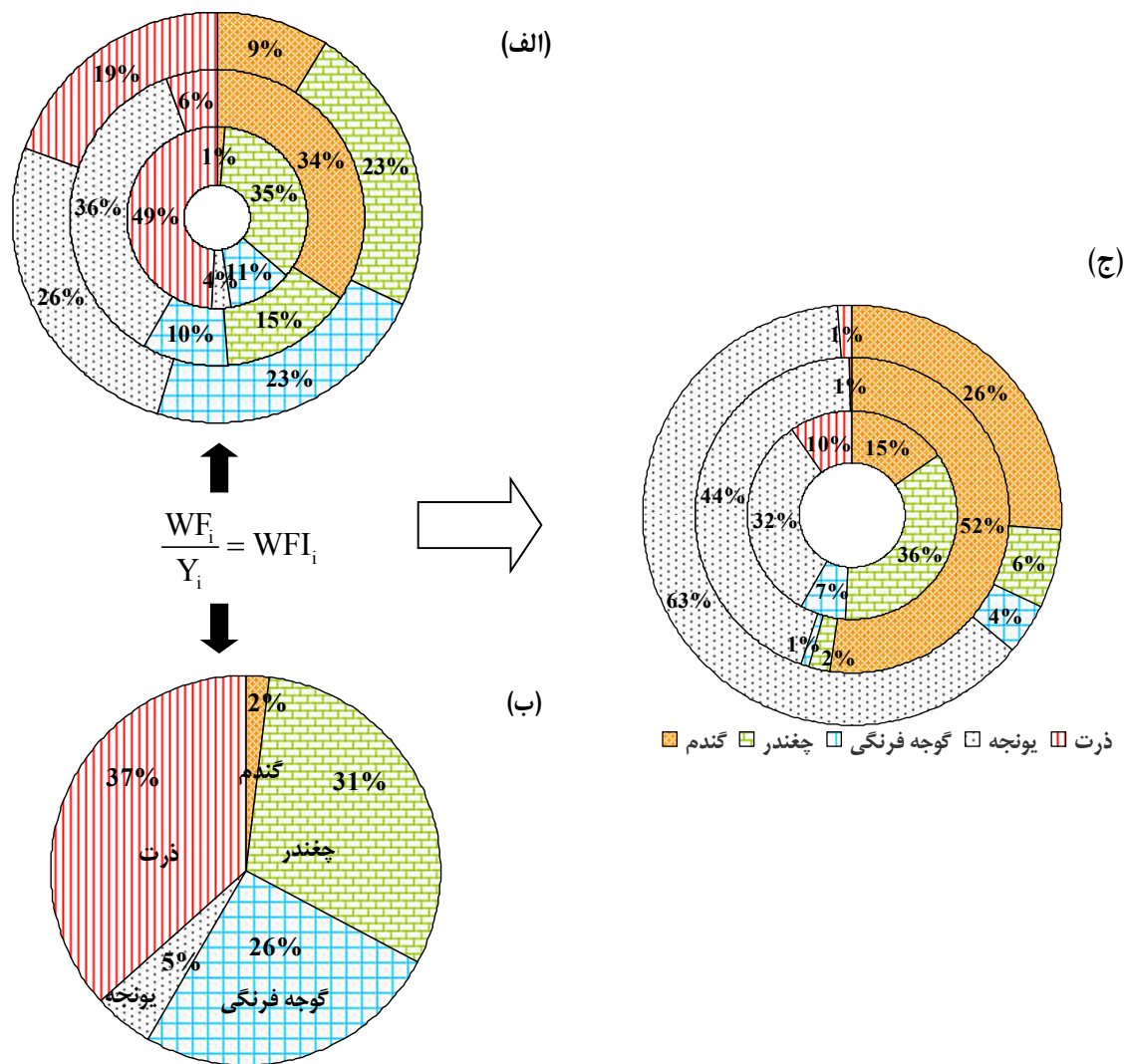
$$WF = \sum_i (I_i \times S_i \times Y_a \times U \times P) \quad [20]$$

$$WF = \sum_i WFi = \sum_i \left[\frac{(WFi / Yi) \times (Yi / Ya)}{\times (Ya / Pa) \times (Pa / P) \times P} \right] \quad [21]$$

که در این روابط مقدار WFi محاسباتی با مقدار WFi به‌دست آمده از رابطه ۱ برابر خواهد بود.

نتایج و بحث

شدت ردپای آب (مترمکعب بر سال) برای پنج محصول گندم، چغندرقد، گوجه فرنگی، یونجه و ذرت علوفه‌ای مورد محاسبه قرار گرفت (شکل ۲-الف). همچنین عملکرد هر یک از محصولات (تن بر سال) نیز محاسبه شده (شکل ۲-ب) و با اعمال عملکرد در ردپای آب، مقدار ردپای آب کل محصولات در واحد تولیدی (مترمکعب بر تن) به‌دست آمد (۲-ج). در شکل ۲-الف و ۲-ج نمودارهای ردپای آب از سه لایه تشکیل شده‌اند که در آنها لایه اول (بیرونی)، مربوط به ردپای آب آبی، لایه دوم (وسط)، مربوط به ردپای آب سبز و لایه سوم (درونی)، مربوط به آب خاکستری محصولات می‌باشند. با توجه به شکل ۲-ب، بیشترین عملکرد مربوط به ذرت، چغندرقد و گوجه فرنگی به ترتیب با ۳۷٪، ۳۱٪، ۲۶٪ بوده و کمترین عملکرد مربوط به یونجه و گندم به ترتیب با ۵٪ و ۲٪ می‌باشد. بیشترین مقدار شدت ردپای آب (WFi) با توجه به شکل ۲-الف مربوط به چغندرقد، گوجه فرنگی و ذرت می‌باشد، ولی با اعمال عملکرد هر یک از محصولات، بیشترین ردپای آب محصول (WFi) به ازای مقدار محصول تولیدی برای گندم و یونجه به‌دست آمد (شکل ۲-ج). همچنین متوسط ردپای آب



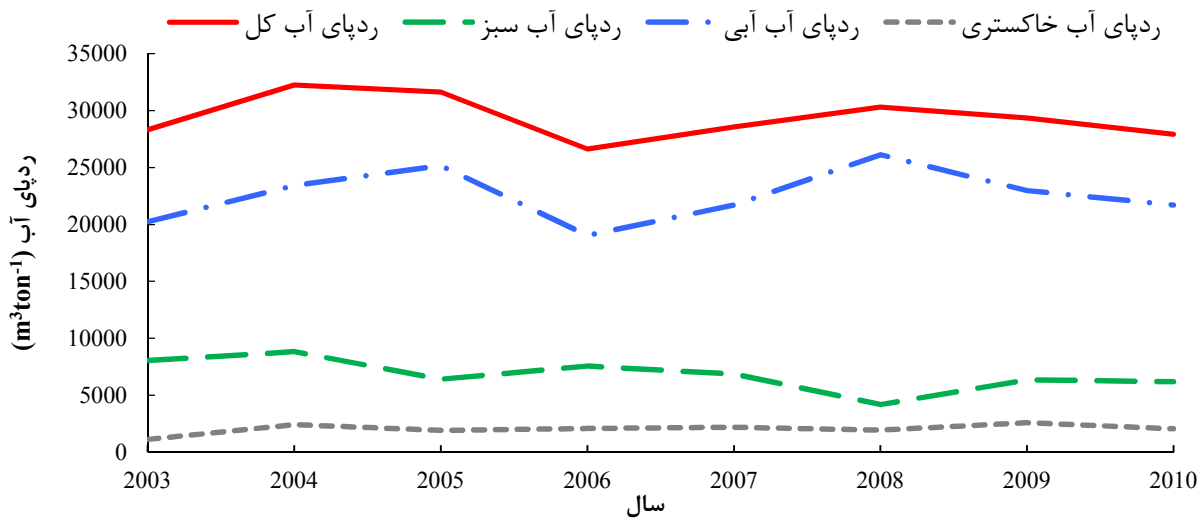
شکل ۲- عملکرد و ردپای آب محصولات به تفکیک آب آبی، آب سبز و آب خاکستری.

همان‌طورکه در شکل ۳ ملاحظه می‌شود، تغییرات ردپای آب روند منظمی را نشان نمی‌دهد. در طی سال‌های ۲۰۰۶-۲۰۰۴ روند تغییرات ردپای آب با تأثیرپذیری از تغییرات کاهشی عامل سیستم‌های آبیاری در کل حوضه (اعداد با بالانویس a در جدول ۱) به شدت کاهش یافته است. این در حالی است که از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۷ با افزایش این عامل (اعداد با بالانویس b در جدول ۱) تغییرات ردپای آب روندی صعودی را به خود گرفته است. همچنین تأثیر دو عامل عملکرد W_Y و جمعیت W_P در میزان تغییرات ردپای آب خاکستری مؤثر بوده و این دو عامل ضمن خنثی کردن نسبی تأثیرات هم، باعث ایجاد تغییرات افزایشی ناچیزی در ردپای آب خاکستری گردیده‌اند.

با توجه به جدول ۱ و شکل ۳ روند تغییرات ردپای آب کاملاً با روند تغییرات پارامترهای مؤثر مورد بررسی مطابق می‌باشد. همان‌طورکه قبلاً ذکر گردید و با توجه به جدول ۱ نیز کاملاً مشهود است، دو عامل سیستم‌های آبیاری W_i و نحوه کشت و زرع W_s بیشترین تأثیر را در تغییرات ردپای آب دارند به‌طوری‌که در تمامی سال‌ها و برای تمامی ایستگاه‌ها این دو عامل مثبت‌ترین یا منفی‌ترین مقادیر را به‌خود اختصاص داده‌اند. با افزایش این عوامل روند تغییرات ردپای آب کل افزایشی و با کاهش آنها، روند تغییرات ردپای آب کل کاهشی می‌باشد.

جدول ۱- تحلیل پارامترهای مؤثر در تغییرات ردیای آب محصولات در ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی.

مهاباد					ارومیه					سال
ΔWFP	ΔWFU	ΔWFY	ΔWFS	ΔWFI	ΔWFP	ΔWFU	ΔWFY	ΔWFS	ΔWFI	
۵۶/۷	-۹/۶	-۴۷/۱	-۲۵۳/۸	۶۲۲/۲	۵۳/۸	-۱۱/۷	-۴۲/۱	-۲۳۹/۱	۸۶۶/۰	۲۰۰۴
۵۹/۴	-۱۰/۳	-۴۹/۱	۶۶/۰	-۷۷/۱	۵۸/۹	-۱۳/۱	-۴۵/۸	۶۴/۳	۹۰/۱	۲۰۰۵
۵۷/۵	-۱۰/۲	-۴۷/۳	۷۰۸/۷	-۱۰۱۱/۷ ^a	۵۴/۹	-۱۲/۴	-۴۲/۵	۶۷۷/۵	-۱۳۷۹/۷ ^a	۲۰۰۶
۵۷/۹	۰/۰	-۵۷/۹	-۴۳۶/۸	۴۹۴/۰ ^b	۵۴/۲	۲۴/۴	-۱۳۰/۴	-۴۱۰/۶	۷۵۴/۳ ^b	۲۰۰۷
۵۸/۷	-۰/۲	-۵۸/۵	۷۴۰/۰	-۷۱۲/۴	۵۵/۰	۲۴/۶	-۲۶/۶	۶۹۳/۹	-۹۴۲/۲	۲۰۰۸
۶۱/۱	-۰/۴	-۶۰/۷	-۵۸۷/۸	۸۹۶/۵	۵۴/۹	۲۴/۳	-۷۹/۲	-۵۲۹/۸	۶۹۳/۰	۲۰۰۹
۶۰/۲	-۰/۵	-۵۹/۷	۶۴۱/۰	-۱۰۹۷/۲	۵۴/۱	۲۳/۸	-۷۷/۹	۵۷۱/۲	-۸۶۴/۸	۲۰۱۰
تکاب					سلماس					سال
ΔWFP	ΔWFU	ΔWFY	ΔWFS	ΔWFI	ΔWFP	ΔWFU	ΔWFY	ΔWFS	ΔWFI	
۵۰/۶	-۸۱/۸	۳۱/۳	-۲۲۲/۲	۶۰۰/۲	۵۴/۸	-۰/۹	-۵۳/۹	-۲۴۲/۵	۵۸۵/۷	۲۰۰۴
۵۳/۸	-۸۶/۸	۳۳/۱	۵۶/۴	۹۲/۵	۵۵/۸	-۱/۲	-۵۴/۶	۵۹/۴	-۲۹۹/۷	۲۰۰۵
۴۹/۸	-۸۰/۲	۳۰/۵	۶۱۴/۸	-۱۲۸۷/۵ ^a	۵۴/۰	-۱/۴	-۵۲/۶	۶۶۶/۷	-۷۳۸/۳ ^a	۲۰۰۶
۴۸/۴	-۸۴/۲	۳۵/۸	-۳۶۸/۶	۵۶۶/۳ ^b	۵۶/۰	-۱۵/۱	-۴۰/۹	-۴۲۷/۱	۵۰۹/۹ ^b	۲۰۰۷
۵۲/۰	-۹۰/۴	۳۸/۴	۶۴۶/۱	-۳۴۰/۶	۵۸/۳	-۱۵/۸	-۴۲/۶	۷۲۸/۲	-۴۹۷/۴	۲۰۰۸
۵۴/۰	-۹۳/۷	۳۹/۷	-۴۸۸/۱	۴۴۱/۲	۶۰/۵	-۱۶/۵	-۴۴/۰	-۵۵۹/۱	۶۲۳/۲	۲۰۰۹
۵۲/۶	-۹۱/۲	۳۸/۶	۵۴۲/۲	-۷۱۴/۹	۵۷/۱	-۱۵/۵	-۴۱/۶	۵۹۱/۳	-۱۱۶۱/۸	۲۰۱۰
مراغه					تبریز					سال
ΔWFP	ΔWFU	ΔWFY	ΔWFS	ΔWFI	ΔWFP	ΔWFU	ΔWFY	ΔWFS	ΔWFI	
۶۸/۹	-۴۹/۸	-۱۹/۱	-۴۵۴/۹	۱۰۸۶/۷	۷۰/۲	۳۶/۲	-۱۰۶/۴	-۴۶۲/۰	۷۰۹/۱	۲۰۰۴
۷۴/۰	-۵۳/۶	-۲۰/۴	۴۶۵/۹	-۴۰۲/۴	۶۹/۷	۳۵/۴	-۱۰۵/۱	۴۴۵/۲	-۸۱۱/۰	۲۰۰۵
۶۱/۴	-۴۴/۶	-۱۶/۸	۸۹۱/۱	-۲۷۳۴/۲ ^a	۶۲/۴	۳۱/۲	-۹۳/۶	۸۹۶/۹	-۱۶۳۶/۶ ^a	۲۰۰۶
۵۷/۷	-۱۶/۶	-۴۱/۱	-۳۹۵/۸	۱۲۸۳/۳ ^b	۶۱/۴	۱/۰	-۶۲/۴	-۴۰۳/۸	۶۶۴/۹ ^b	۲۰۰۷
۶۸/۲	-۱۹/۷	-۴۸/۴	۲۴۰/۰	۳۳۸/۷	۶۷/۰	۰/۹	-۶۷/۹	۲۳۷/۴	۲۸۰/۴	۲۰۰۸
۶۸/۳	-۱۹/۹	-۴۸/۴	۸۸/۱	-۶۶۴/۱	۶۵/۹	۰/۷	-۶۶/۶	۸۳/۵	-۷۷۹/۹	۲۰۰۹
۶۴/۲	-۱۸/۸	-۴۵/۴	۳۰۷/۴	-۳۸۵/۰	۶۱/۵	۰/۵	-۶۲/۰	۲۹۴/۷	-۲۸۵/۸	۲۰۱۰
متوسط کل حوضه					سراب					سال
ΔWFP	ΔWFU	ΔWFY	ΔWFS	ΔWFI	ΔWFP	ΔWFU	ΔWFY	ΔWFS	ΔWFI	
۵۷/۴	-۲۹/۰	-۲۸/۴	-۳۱۱/۹	۸۷۵/۴	۴۶/۸	-۸۵/۳	۳۸/۵	-۳۰۸/۵	۱۶۵۷/۷	۲۰۰۴
۶۰/۹	-۳۲/۸	-۲۸/۱	۲۱۶/۲	-۲۸۴/۹	۵۵/۱	-۱۰۰/۲	۴۵/۱	۳۵۶/۶	-۵۸۶/۳	۲۰۰۵
۵۵/۶	-۲۹/۵	-۲۶/۰	۷۳۸/۴	-۱۴۵۱/۸ ^a	۴۹/۱	-۸۹/۱	۴۰/۰	۷۱۳/۰	-۱۳۷۴/۹ ^a	۲۰۰۶
۵۴/۷	-۲۰/۹	-۴۱/۲	-۳۹۶/۹	۶۷۵/۳ ^b	۴۷/۲	-۵۵/۸	۸/۶	-۳۳۵/۷	۴۵۴/۵ ^b	۲۰۰۷
۵۸/۵	-۲۲/۹	-۲۸/۱	۴۹۵/۴	-۲۴۵/۴	۵۰/۶	-۵۹/۸	۹/۲	۱۸۱/۹	۱۵۵/۷	۲۰۰۸
۵۹/۵	-۲۳/۸	-۳۵/۷	-۲۷۶/۰	۱۳۵/۸	۵۱/۷	-۶۱/۱	۹/۴	۶۱/۲	-۲۵۹/۳	۲۰۰۹
۵۷/۳	-۲۳/۲	-۳۴/۱	۴۵۶/۷	-۶۵۹/۱	۵۱/۶	-۶۰/۹	۹/۳	۲۴۹/۳	-۱۰۴/۵	۲۰۱۰



شکل ۳- متوسط ردپای آب محصولات در سه جزء آب آبی، آب سبز و آب خاکستری برای سال‌های ۲۰۰۳-۲۰۱۰.

نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه ردپای آب محصولات تولیدی و نیز عوامل مؤثر بر روند تغییرات ردپای آب با استفاده از روش LMDI در حوضه آبریز دریاچه ارومیه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بررسی‌ها حاکی از روند کلی نزولی در سری داده‌های ردپای آب محاسبه شده در طی سال‌های مورد مطالعه (۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰) می‌باشد. در طی ۸ سال مورد بررسی، ردپای آب کل، سه دوره تغییرات اساسی را نشان می‌دهد. بدین ترتیب که از سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۶ دارای روند کاهشی، از سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۸ دارای روند افزایشی و از سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۰ دارای روند کاهشی می‌باشد. تأثیرات ساختارها و تکنولوژی‌های آبیاری و همچنین نحوه کشت و زرع و فعالیت‌های کشاورزی به عنوان عوامل شتاب‌دهنده تغییرات ردپای آب در حوضه مورد مطالعه می‌باشد. این در حالی است که سطح زیرکشت، عملکرد، افزایش جمعیت و شهرنشینی تأثیر کمتری را بر میزان تغییرات ردپای آب داشته‌اند. بنابراین پیشرفت تکنولوژی‌های ذخیره آب و بهبود بخشی ساختار کشاورزی و نحوه کشت و زرع کشاورزان، گزینه‌های مقرون به صرفه و

مناسبی برای ارتقاء فرآیندهای ذخیره‌سازی آب می‌باشند. اما از آنجاکه استفاده از ساختارها و تکنولوژی‌های آبیاری جدید و پیشرفته در طی سال‌های اخیر دارای موفقیت قابل ملاحظه‌ای نبوده، بایستی برنامه‌ریزی‌های جامعی به منظور توسعه هرچه بیشتر سیستم‌های آبیاری جدید در منطقه صورت گیرد. انتخاب الگوی کشت مناسب نیز از دیگر عوامل مؤثر در ذخیره هر چه بیشتر آب در بخش کشاورزی می‌باشد. در این مطالعه با توجه به مقادیر ردپای آب سبز در مقابل ردپای آب کل محاسبه شده، در بین محصولات مورد بررسی، گیاهان گندم و یونجه به دلیل تأمین ۲۰ و ۴۵ درصد آب مورد نیاز آنها توسط آب سبز (برای محصولات چغندر قند، گوجه فرنگی و ذرت علوفه‌ای، به ترتیب ۹، ۶ و ۴ درصد) به عنوان گیاهان مطلوب برای شرایط کم آبی و دیم (گندم) پیشنهاد می‌گردند. لازم به ذکر است که محصول یونجه در منطقه مطالعاتی عمدتاً به صورت پاییزی کشت شده و در سال حدوداً ۲ یا ۳ چین برداشت می‌شود. چین اول محصول در بهار بوده و چین‌های دوم و سوم در فصل تابستان و اوایل پاییز انجام می‌گردد. از آنجاکه آب مصرفی محصول یونجه در ماه‌های آبان الی اردیبهشت متناسب با بارندگی منطقه بوده ولی

با توجه به نتایج حاصل، ساختارها و تکنولوژی‌های آبیاری، نحوه کشت و زرع و فعالیت‌های کشاورزی، سطح زیرکشت، عملکرد، افزایش جمعیت و شهرنشینی به‌ترتیب به‌عنوان عوامل مؤثر در ردپای آب گیاهان مورد بررسی در منطقه مطالعاتی اولویت‌بندی می‌شوند.

نیاز آبی آن در ماه‌های خرداد الی مهرماه بعد از چین اول بایستی از طریق آبیاری تأمین گردد، لذا می‌توان با حذف دوره ثانویه این محصول (چین آخر) میزان آب مصرفی آن که عمدتاً از آب آبی تأمین می‌شود را کاهش داده و متناسب با شرایط کم آبی منظور نمود. در نهایت

منابع مورد استفاده

- AghaKouchak A, Norouzi H, Madani K, Mirchi A, Azarderakhsh M, Nazemi N, Nasrollahi N, Mehran M, Farahmand A and Hasanzadeh E, 2015. Aral Sea syndrome desiccates Lake Urmia: call for action. *Journal of Great Lakes Research*, 41(1): 307-311.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D and Smith M, 1998. *Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, ISBN 92-5-104219-5.
- Anonymous, 2010a. CROPWAT 8.0 model', FAO, Rome, www.fao.org/nr/water/infores/databases_crowpat.html.
- Anonymous, 2010b. AQUACROP 3.1', FAO, Rome, www.fao.org/nr/water/aquacrop.html.
- Chapagain AK, Hoekstra AY, Savenije HHG, and Gautam R, 2006. The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. *Ecological Economics* 60 (1): 186–203.
- Chapagain AK, Hoekstra AY, 2011. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. *Ecological Economics* 70: 749–758.
- Feng K, Ling Siu Y, Guan D and Hubacek K, 2012. Assessing regional virtual water flows and water footprints in the Yellow River Basin, China: A consumption based approach. *Applied Geography* 32: 691-701.
- Gerbens-Leenes PW, Mekonnen MM and Hoekstra AY, 2013. The water footprint of poultry, pork and beef: A comparative study in different countries and production systems. *Water Resources and Industry* 1(2): 25–36.
- Hoekstra AY, 2007. *Human Appropriation of Natural Capital: Comparing Ecological Footprint and Water Footprint Analysis*. Value of the Water Research Report Series No. 23 UNESCO-IHE, Delft, and the Netherlands.
- Hoekstra AY, Chapagain AK, 2007. The water footprints of Morocco and the Netherlands: Global water use as a result of domestic consumption of agricultural commodities. *Ecological Economics* 64: 143–151.
- Hoekstra AY, Hung PQ, 2002. Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. Value of Water Research Report Series No. 11, UNESCOIHE, Delft, The Netherlands.
- Hoekstra AY, Hung PQ, 2005. Globalization of water resources: International virtual water flows in relation to crop trade. *Global Environmental Change* 15(1): 45-56.
- Hoekstra AY, Chapagain AK, Aldaya MM and Mekonnen MM, 2011. *The water footprint assessment manual: Setting the global standard*, Earthscan, London, UK.
- 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.
- Mekonnen MM, Hoekstra AY, 2014. Water footprint benchmarks for crop production: A first global assessment. *Ecological Indicators* 46: 214-223.
- Rodriguez CI, de Galarreta VR, and Kruse EE, 2015. Analysis of water footprint of potato production in the pampean region of Argentina. *Cleaner Production* 90: 91–96.
- Rost S, Gerten D, Bondeau A, Lucht W, Rohwer J, Schaphoff S, 2008. Agricultural green and blue water consumption and its influence on the global water system. *Water Resources Research* 44(9): 1-17.
- Van Oel PR, Mekonnen MM and Hoekstra AY, 2009. The external water footprint of the Netherlands: Geographically-explicit quantification and impact assessment. *Ecological Economics* 69: 82–92.
- Wang YB, Wu PT, Engel BA, and Sun SK, 2015. Comparison of volumetric and stress-weighted water footprint of grain products in China. *Ecological Indicators* 48: 324–333.
- Yu Y, Hubacek K, Feng K and Guan D, 2010. Assessing regional and global water footprints for the UK. *Ecological Economics* 69: 1140–1147.
- Xu Y, Huang K, Yu Y, and Wang X, 2015. Changes in water footprint of crop production in Beijing from 1978 to 2012: a logarithmic mean Divisia index decomposition analysis. *Cleaner Production* 87: 180-187.
- Zhang GP, Hoekstra AY and Tickner D, 2012. Proceedings of the Session 'Solving the Water Crisis: Common Action toward a Sustainable Water Footprint'. Planet under Pressure Conference, London, 26 March.