

بررسی عملکرد محصولات کشاورزی و افزایش راندمان آبیاری در منابع آب‌های

زیرزمینی با استفاده از شاخص رد پای آب

توحید علیقلی نیا^۱، منیره فغانی^{۲*}، خلیل قربانی^۳

۱-دکترای علوم و مهندسی آب، کارشناس زیستگاه‌های آبی اداره کل حفاظت محیط زیست آذربایجان غربی، ارومیه، ایران.

۲-دکتری علوم و مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

۳-دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

* نویسنده مسئول: monir.faghani@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۲۷

چکیده

در سال‌های اخیر، با رشد جمعیت و افزایش تقاضا برای تولید محصولات بیشتر، فعالیت‌های کشاورزی رشد بیشتری در دشت ارومیه داشته و با توجه به محدود بودن منابع آب‌های سطحی، عمدتاً برداشت از آب‌های زیرزمینی، منجر به افت شدید منابع آب زیرزمینی در این منطقه شده است. در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر محصولات کشاورزی بر تنش‌های وارده بر آب‌های زیرزمینی، شاخص ردپای آب زیرزمینی^۱ به کار گرفته شد. بدین منظور هشت محصول زراعی انتخاب شدند و شاخص‌های ردپای آب^۲ محصولات، ردپای آب زیرزمینی، تنش وارده به آب‌های زیرزمینی، شدت مصرف آب و بهره‌وری مورد محاسبه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که مقدار شاخص ردپای آب زیرزمینی برای تمامی محصولات مورد بررسی در دشت ارومیه ۵۱۰۴/۴۶ کیلومتر مربع و مقدار تنش وارده بر آب‌های زیرزمینی ۵/۹۷ واحد به دست آمد. در بین محصولات مورد بررسی نیز دو محصول گندم و یونجه به ترتیب با ۱/۷۸ و ۲/۸ واحد بیشترین تنش را به آب‌های زیرزمینی منطقه وارد می‌کنند. با افزایش راندمان آبیاری به ۲۵ درصد، میزان شاخص تنش وارده بر آب‌های زیرزمینی برای محصول گندم به کمتر از ۱ واحد رسید. نتایج حاصل از بررسی شدت مصرف آب و بهره‌وری محصولات نیز نشان داد که با افزایش راندمان، از شدت مصرف آب کاسته شده و بهره‌وری محصولات افزایش می‌یابد؛ اما افزایش راندمان آبیاری به تنهایی از بین برنده کل تنش‌های وارده بخش کشاورزی به محیط زیست و به خصوص منابع آب‌های زیرزمینی نخواهد بود و فقط یک عامل کمکی در کنار سایر عوامل می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: بهره‌وری، دشت ارومیه، ردپای آب زیرزمینی، شدت مصرف آب.

¹ Ground water footprint

² Water footprint

مقدمه

مصارف آب در بسیاری از دشت‌ها بوده و ضرورت به کارگیری سیاست‌های منطقی و کارآمد مدیریت آب را بیش از هر زمان دیگر مطرح می‌نماید. سیاست‌های مذکور می‌بایست جامع بوده و هر دو طرف، عرضه و تقاضای آب را مد نظر قرار دهند (سلطانی و زیبایی، ۱۳۹۰). به منظور ایجاد تعادل بین عرضه و تقاضای آب در شرایط اقلیمی و جغرافیایی متفاوت و پاسخگویی به نیاز روزافزون تقاضای آب در کشور، می‌توان به توسعه مفاهیمی جدید در بخش مدیریت منابع آبی، مانند مفهوم ردپای آب زیرزمینی اشاره کرد. ردپای آب زیرزمینی، مساحت مورد نیاز برای استفاده پایدار از آب زیرزمینی و اکوسیستم‌های وابسته به آن را بیان می‌کند (گلوسن و همکاران، ۲۰۱۲). این شاخص پس از تعریف مفاهیمی همچون ردپای اکولوژیک زمین و ردپای آب بیان گردید تا تأثیر آب مصرفی واقعی محصولات را بر روی اکوسیستم آب زیرزمینی مشخص کند. شاخص ردپای اکولوژیک زمین که در نیمه دوم دهه ۱۹۹۰ مطرح گردید تعیین‌کننده مقدار زمین اکولوژیک موردنیاز برای تأمین مایحتاج افراد ساکن در یک محدوده جغرافیایی می‌باشد (واکر ناژل و رییز، ۱۹۹۶). ردپای آب شاخصی است برای نشان دادن حجم آبی که به طور مستقیم یا غیر مستقیم برای تولید کالا و یا ارائه هرگونه خدمات به مصرف می‌رسد (هواکسترا و همکاران، ۲۰۱۱). هر دوی این شاخص‌ها ابزار قدرتمندی برای برنامه‌ریزی، آموزش و آگاهی عمومی هستند؛ با این حال هیچ یک از این شاخص‌ها قادر به ارزیابی تأثیر مصرف آب بر منابع طبیعی و اکولوژیک نبوده و نمی‌توانند تنشی که در حین تولید کالا یا ارائه خدمات به منابع طبیعی وارد می‌شود را نشان دهند (هواکسترا و همکاران، ۲۰۰۹). به همین منظور گلوسن و همکاران (۲۰۱۲) به ارائه شاخصی تحت عنوان شاخص ردپای آب زیرزمینی پرداختند تا به وسیله آن بتوانند به ارزیابی تأثیر مصرف آب بر منابع طبیعی و تنش وارده بر سفره‌های آب زیرزمینی مورد بهره‌برداری بپردازند. آنها پس از تعریف مفهوم شاخص ردپای آب زیرزمینی، به بررسی تنش وارده در برخی از آبخوان‌ها با استفاده از شاخص فوق پرداختند. آنها برای این منظور ۱۶ آبخوان بزرگ در ۱۴ کشور را انتخاب کردند و ضمن محاسبه مقدار ردپای آب زیرزمینی

سفره‌های آب زیرزمینی از منابع آبی مهم و دومین منابع آب شیرین موجود در جهان هستند و در حدود ۰/۱۶٪ از کل منابع آب و ۶۰٪ از منابع تجدیدپذیر قابل دسترس را به خود اختصاص می‌دهند که در سال‌های اخیر به دلیل افزایش جمعیت، افزایش بهره‌برداری از منابع آب، کمبود منابع آب سطحی و توزیع نامناسب آن، سطح سفره‌های زیرزمینی افت قابل ملاحظه‌ای داشته‌اند. این معضل در زمان خشکسالی و برداشت بی‌رویه آن در سال‌های اخیر در بسیاری از نقاط دنیا که با کمبود آب روبرو هستند، مشکلات عدیده‌ای را ایجاد کرده است که می‌توان به مواردی همچون نشست زمین، تحت تأثیر قرار گرفتن کیفیت آب و به وجود آمدن شرایط بحرانی در اکوسیستم‌ها اشاره کرد. اتفاقی که در آب‌های زیرزمینی حوضه دریاچه ارومیه افتاده است از این قاعده مستثنا نبوده و خشک شدن دریاچه ارومیه و افت شدید سطح آب زیرزمینی در حوضه آن که در سال‌های اخیر جنبه بین‌المللی به خود گرفته، از پیامدهای آن و در نتیجه به کارگیری سیاست‌های غلط در بهره‌برداری از منابع آب و عدم مدیریت صحیح بخش کشاورزی بوده است. در دشت ارومیه سهم آب‌های سطحی در تأمین آب در بخش‌های مختلف کشاورزی، شهری و صنعتی ۳۰٪ و سهم منابع آب‌های زیرزمینی ۷۰٪ است و این موضوع حاکی از فشار مضاعف بر منابع آب زیرزمینی در این دشت می‌باشد (مهندسین مشاور فرسپند آب، ۱۳۸۹). پمپاژ بیش از حد از سفره‌های آب زیرزمینی بدون توجه به امکانات سفره‌ها و میزان تغذیه طبیعی آن‌ها موجب افت سطح آب‌های زیرزمینی می‌شود (مسعودی و برزگر، ۱۳۹۴). از این رو شناخت و بررسی تأثیر پذیری کمیت آب‌های زیرزمینی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و آسیب‌پذیرترین منابع تأمین آب به خصوص در بخش کشاورزی و بررسی نقش عوامل تأثیرگذار در آن امری بدیهی است (ریزو و موزر، ۲۰۰۰). عدم شناخت صحیح و یا عدم درک میزان آسیب‌پذیری سریع آب‌های زیرزمینی ممکن است سبب ایجاد مشکلات شدید و غیر قابل جبران در این منابع شود (تاپینتا و هوداک، ۲۰۰۳). مطالعات پژوهشگران حاکی از عدم تعادل بین منابع و

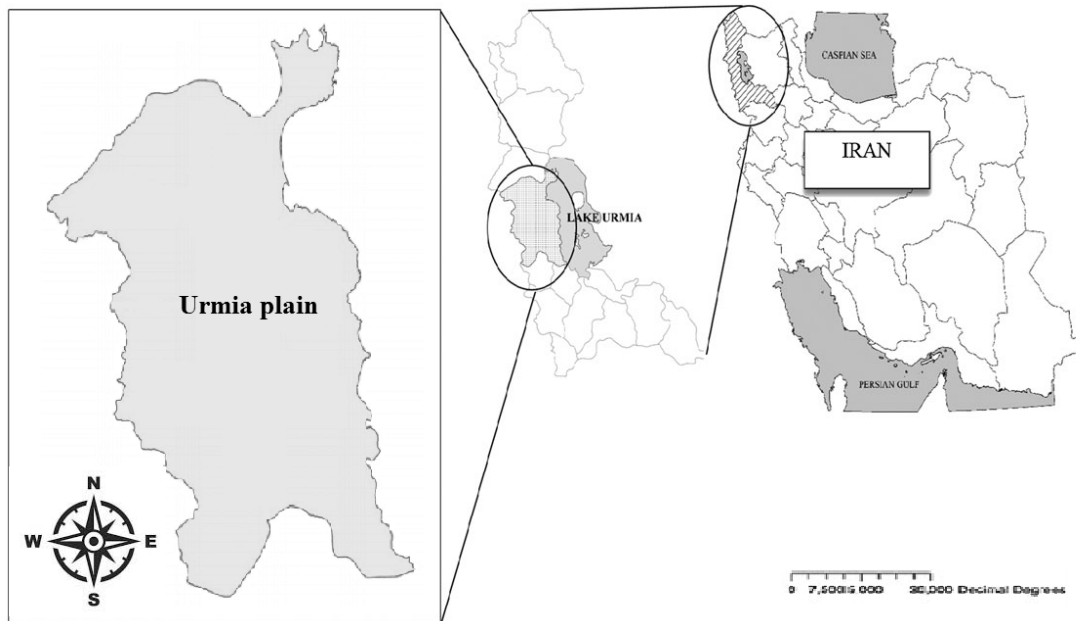
مطالعه خود به این نتیجه رسیدند که بیشترین تنش وارده بر آب‌های زیرزمینی، مربوط به محصولات است که به عنوان خوراک دام استفاده می‌شود؛ اما از آنجائی که این شاخص جدیداً در علم مدیریت منابع آبی در دنیا مطرح شده و تاکنون جز مطالعات محدودی که در برخی از کشورهای پیشرفته و توسعه‌یافته اروپایی و آمریکایی انجام گردیده، پژوهش‌های دیگری صورت نگرفته است؛ لذا لزوم استفاده از این شاخص و بررسی کمیت منابع آب‌های زیرزمینی و تأثیر پذیری آنها از اهمیت زیادی برخوردار بوده و توجه پژوهشگران و دانشمندان صنعت آب را بیش از پیش به این موضوع می‌طلبد. با توجه به موضوع بحرانی شدن افت شدید سطح آب زیرزمینی دشت ارومیه در مرکز استان آذربایجان غربی و حوضه دریاچه ارومیه و تأثیرگذاری آن بر اکوسیستم منطقه و ایجاد معضلاتی همچون خشک‌شدن دریاچه ارومیه و تبدیل شدن آن به مسأله بین‌المللی، این پژوهش به منظور تأثیر افزایش راندمان آبیاری در کاهش تنش وارده به آب‌های زیرزمینی و ارزیابی کردن معضلات ناشی از آن مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

دشت ارومیه با مساحت ۲۶۲۷ کیلومتر مربع یکی از دشت‌های حاصلخیز در شمال غرب کشور و در حاشیه دریاچه ارومیه بوده که دارای بستر بسیار مناسبی برای کشاورزی و فعالیت‌های زراعی از نظر آب و هوا و خاک می‌باشد. مساحت اکیفر در این دشت ۸۵۵ کیلومتر مربع بوده و منابع آب تجدیدپذیر ۱۱۰/۵ میلیون متر مکعب در سال می‌باشد. نرخ تغذیه در این دشت ۰/۵۳ میلیون متر مکعب در سال و متوسط راندمان آبیاری ۳۶٪ بوده و این منطقه به عنوان یکی از اصلی‌ترین قطب‌های کشاورزی در کشور مطرح شده و کشاورزی یکی از ارکان اصلی فعالیت‌های مردم این منطقه می‌باشد.

در این آبخوان‌ها، تنش وارده بر آنها را نیز محاسبه کردند. نتایج نشان داد که اکثر آبخوان‌های دنیا در حال تنش بر اثر افزایش برداشت هستند. همچنین مقدار متوسط جهانی تنش ۳/۵ واحد بوده در حالی که بیشترین تنش موجود در آبخوان‌های دنیا در بخش‌های شمال و شمال‌شرقی ایران با مقدار ۹۸/۳ واحد می‌باشد. گلوسن و وادا (۲۰۱۳) با توجه به نتایج پژوهشی که در سال ۲۰۱۲ انجام داده بودند، به تفسیر تنش وارده بر آب‌های زیرزمینی کل کشورها با تمرکز بر کشورهای هند و ایالات متحده آمریکا به دلیل داشتن بالاترین نرخ برداشت آب زیرزمینی در بین سایر کشورها پرداختند و نتایج آنها نشان داد که در ایالات متحده آمریکا در مقایسه با هند، کمترین میزان تنش آب‌های زیرزمینی به مناطق با جمعیت و چاه‌های کمتر وارد می‌شود. پدرز و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی به ارزیابی کمبود آب زیرزمینی و میزان تنش‌های وارده بر آن با استفاده از شاخص ردپای آب زیرزمینی پرداختند. آنها این مطالعه را در بخش شمالی کلمبیا که شامل ۶ سفره آب زیرزمینی بوده انجام دادند و نتایج پژوهش آنها نشان داد که یکی از این ۶ سفره مورد مطالعه دارای تنش آبی بالایی است که برای حل این مشکل و کاهش تنش بر آب زیرزمینی آن سفره، استفاده از سیستم تغذیه مصنوعی پیشنهاد شد. در پژوهش‌های کورجیاس و همکاران (۲۰۱۸) در جزیره کرت (از جزایر یونان) که در دریای مدیترانه انجام دادند، ردپای آب زیرزمینی و تنش وارده بر آن در ۱۱ آکیفر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج پژوهش نشان داد که ۳ سفره از ۱۱ سفره آب زیرزمینی مورد بررسی دارای تنش آبی بالایی بوده که علت آن برداشت بیش از حد آب‌های این سفره‌ها برای مصارف کشاورزی بوده است. در پژوهشی دیگر نیز اسنالت و همکاران (۲۰۱۴) ردپای آب زیرزمینی را برای هر محصول توسعه دادند. آنها در مطالعه خود به بررسی ردپای آب زیرزمینی محصولات مختلف در دو آبخوان با برداشت زیاد، در ایالات متحده آمریکا پرداختند. نتایج آنها نشان داد که در هر دو آبخوان، ذرت و پنبه بیشترین مقدار ردپای آب زیرزمینی را به خود اختصاص دادند. همچنین آنها در



شکل (۱): موقعیت محدوده مورد مطالعه
Figure 1- The Location of study area

آمارنامه‌های کشاورزی (آمارنامه‌های جهاد کشاورزی، ۱۳۹۴-۱۳۸۵)، سند ملی کشور و آمارنامه‌های سازمان خواروبار جهانی (FAO) استخراج گردید (FAO, 2005-2014). جدول (۱) مشخصات گیاهی محصولات را نشان می‌دهند.

داده‌های مورد استفاده

داده‌های هواشناسی مورد نیاز پژوهش، شامل دمای حداقل، دمای حداکثر، درصد رطوبت نسبی، ساعت آفتابی، سرعت باد و بارندگی در مقیاس ماهانه از سازمان هواشناسی کشور تهیه شده و داده‌های مربوط به مشخصات گیاهی شامل طول دوره رشد، ارتفاع گیاه، عملکرد محصولات، عمق ریشه و ضریب گیاهی از

جدول ۱- مشخصات گیاهی محصولات مورد مطالعه (دهقان و همکاران، ۱۳۹۲)

Table 1 - Plant characteristics of the studied products (Dehgan et al., 2013)

طول دوره رشد Length of growth period (day)	سطح زیر کشت Cultivated area (ha)	عملکرد Yield (kg/ha)	نیاز آبیاری Irrigation requirement (mm/year)	محصولات Products
250	14333	3426	260	گندم (Wheat)
150	127	32377	521	گوجه‌فرنگی (Tomato)
365	18039	11252	762	یونجه (Alfalfa)
120	147	4222	390	ذرت (دانه‌ای و علوفه‌ای) (Corn (grains and fodder))
230	995	2374	178	جو (barley)
120	727	2582	320	لوبیا و نخود (Beans and peas)

160	1905	16720	580	سیب‌زمینی (Potato)
180	1300	23192	657	چغندر قند (Sugar beet)

شاخص رد پای آب^۱

رد پای آب زیرزمینی مساحت مورد نیاز برای استفاده پایدار از آب زیرزمینی و اکوسیستم‌های وابسته به آن می‌باشد که نحوه محاسبه این شاخص به صورت رابطه (۱) می‌باشد (اسنالت و همکاران، ۲۰۱۴).

$$GF = \frac{C}{R - E} \times A_{aq} \quad (1)$$

که در آن، GF: رد پای آب زیرزمینی [L²]^۲، C: متوسط مقدار برداشت سالانه از آبخوان [L/T]^۳، R: نرخ تغذیه با در نظر گرفتن تغذیه مصنوعی ناشی از آب بازگشتی از آبیاری [L/T]، E: سهم جریان‌های زیست‌محیطی از آب‌های زیرزمینی [L/T] و A_{aq}: مساحت آبخوان [L²] می‌باشند. C_i نیز به صورت رابطه (۲) تعریف می‌گردد:

$$C_i = \frac{Ga_{i,aq}}{A_{aq}} \quad (2)$$

که در آن، C_i: متوسط مساحت برداشت سالانه از هر آبخوان [L/T] و Ga_{i,aq}: برداشت از آب هر آبخوان برای هر محصول کشاورزی [L³/T]^۴ است که به صورت رابطه (۴) محاسبه می‌گردد. با جایگذاری C_i در رابطه (۱)، رد پای آب زیرزمینی به صورت رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$GF_{i,aq} = \frac{Ga_{i,aq}}{R_{aq} - E_{aq}} \quad (3)$$

$$Ga_{i,aq} = \sum_{\{i \in co, co \cap aq \neq \emptyset\}} Ga_{i,co} \quad (4)$$

در روابط فوق نیز، GF_{i,aq}: رد پای آب زیرزمینی در هر آبخوان برای هر محصول کشاورزی [L²]، R_{aq} و E_{aq}: مشابه تعریف رابطه قبل به ترتیب نرخ تغذیه آبخوان و سهم آبخوان برای جریان زیست محیطی [L/T]، Ga_{i,aq}:

رد پای آب زیرزمینی در هر آبخوان [L³/T] و Ga_{i,co}: رد پای آب زیرزمینی برای هر محصول کشاورزی [L³/T] می‌باشند. رد پای آب زیرزمینی در هر آبخوان نیز بر اساس رد پای آب آبی، راندمان آبیاری، مساحت زیر کشت و مساحتی از سطح زیر کشت هر محصول که توسط آب زیرزمینی آبیاری می‌شود به صورت رابطه (۵) محاسبه می‌گردد:

$$Ga_{i,co} = \frac{B_{i,co}}{e_{i,co}} \times Acr_{i,co} \times P_i \quad (5)$$

که در آن، B_{i,co}: رد پای آب آبی هر محصول کشاورزی در واحد سطح [L³/T / L²]^۵، e_{i,co}: راندمان آبیاری هر محصول کشاورزی، Acr_{i,co}: مساحت زیر کشت هر محصول [L²] و P_i: درصد مساحتی از سطح زیر کشت هر محصول است که توسط آب زیرزمینی آبیاری می‌شوند. تنش وارده بر آب‌های زیرزمینی نیز از نسبت رد پای آب زیرزمینی (GF) به مساحت آبخوان (A_{aq}) به صورت رابطه (۶) به دست می‌آید:

$$Stress = \frac{GF}{A_{aq}} \quad (6)$$

در رابطه (۶) اگر میزان نسبت رد پای آب زیرزمینی به مساحت آبخوان بیشتر از ۱ باشد (Stress > 1)، نشان دهنده بروز تنش در منابع آب‌های زیرزمینی بوده و هرچه این مقدار بیشتر باشد، تنش با شدت بیشتری بر آبخوان‌ها وارد می‌شود.

در بررسی رد پای آب یک محصول نیز از روشی که هواکسترا و همکاران (۲۰۰۲) در راهنمای محاسبه رد پای آب ارائه دادند؛ استفاده شد. رد پای آب برای هر محصولات زراعی در حال رشد حاصل جمع دو جز آب آبی و آب سبز می‌باشد که به صورت رابطه (۷) محاسبه می‌شوند.

$$WF_{proc} = WF_{proc, green} + WF_{proc, blue} \quad (7)$$

^۵ L³/T/L²: بعد حجم بر زمان بر مساحت مانند مترمکعب بر سال بر متر مربع

^۱ - water footprint

^۲ L²: بعد مساحت مانند مترمربع یا کیلومترمربع

^۳ L/T: بعد طول بر زمان مانند متر در سال

^۴ L³/T: بعد حجم بر زمان مانند مترمکعب بر سال

$$CWU_{blue} = 10 * \sum_{d=1}^{lgp} ET_{blue} \quad (11)$$

که در آن ET_{green} : نشان‌دهنده تبخیر و تعرق آب سبز و ET_{blue} : نشان‌دهنده تبخیر و تعرق آب آبی می‌باشند. عدد ۱۰ نیز به منظور تبدیل عمق آب در میلی‌متر به حجم آب در سطح زمین m^3/ha می‌باشد. در روابط (۱۰) و (۱۱)، lgp : طول دوره رشد در واحد روز است. بدین ترتیب 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. از آنجا که محصولات مختلف می‌توانند برای محاسبه ردپای آب مد نظر قرار بگیرند، لذا تفاوت‌ها در طول دوره رشد هر کدام از محصولات می‌تواند به‌طور قابل ملاحظه‌ای محاسبات مربوط به ردپای آب را تحت تأثیر قرار دهد. آلن و همکاران (۱۹۹۸) به‌منظور محاسبه تبخیر و تعرق روزانه رابطه (۱۲) را ارائه دادند.

$$ET = K_s [t] * K_c [t] * ET_0 [t] \quad (12)$$

که در آن $K_c[t]$: ضریب گیاهی و $K_s[t]$ عامل بدون بعد کاهش تعرق که وابسته به آب قابل دسترس در خاک می‌باشد. $ET_0 [t]$ نیز تبخیر و تعرق مرجع می‌باشد. $K_s[t]$ بر اساس تابع روزانه حداکثر مقدار واقعی رطوبت قابل دسترس در ناحیه ریشه خاک قابل محاسبه است.

$$K_s[t] = \begin{cases} \frac{S[t]}{(1-p) * S_{max}[t]} & , S[t] < (1-p) * S_{max}[t] \\ 1 & , \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

در رابطه (۱۳)، $S_{max}[t]$ حداکثر 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 یک منطقه را می‌توان با اندازه‌گیری مستقیم یا با تخمین با استفاده از یک مدل یا فرمول تجربی محاسبه نمود. از آنجایی که اندازه‌گیری مستقیم تبخیر و تعرق کاری پرهزینه و غیرمعمول می‌باشد، در اکثر موارد از روش‌های غیرمستقیم استفاده

در این رابطه WF_{proc} ردپای کل آب برای محصولات زراعی در حال رشد، $WF_{proc,green}$ به‌عنوان ردپای آب سبز گیاه تولیدی (جزء سبز) و $WF_{proc,blue}$ به‌عنوان ردپای آب آبی گیاه تولیدی (جزء آبی) می‌باشند. آب سبز به حجم آبی اطلاق می‌شود که در مناطق غیراشباع خاک به‌صورت رطوبت خاک ذخیره می‌شود. این منبع آبی در مناطق دیم به‌صورت مؤثر صرف تعرق گیاهی می‌شود و یا از سطح خاک و آب‌های آزاد به صورت تبخیر از دسترس خارج می‌گردد (ابوبی و همکاران، ۲۰۰۵). آب‌های زیرزمینی و آب‌های سطحی (دریاچه‌ها و رودخانه‌ها)، آب آبی را تشکیل می‌دهند (رینگرسم، ۲۰۰۳) و به مجموع آبی که از این منابع برای رشد یک گیاه استفاده می‌شود، ردپای آبی آن گیاه اطلاق می‌گردد. در رابطه (۷) 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 معادل لیتر بر کیلوگرم استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که بهره‌وری محصولات نیز به صورت معکوس رابطه فوق $(1/WF_{proc})$ با نسبت ton/m^3 یا kg/m^3 به‌دست می‌آید. جزء سبز نیز در ردپای آب محصول زراعی در حال رشد به‌صورت رابطه (۸) تعریف می‌گردد.

$$WF_{proc, green} = \frac{CWU_{green}}{Y} \quad [Volume/Mass] \quad (8)$$

همچنین جز آبی به‌طور مشابه به‌صورت رابطه (۹) تعریف می‌گردد.

$$WF_{proc, blue} = \frac{CWU_{blue}}{Y} \quad [Volume/Mass] \quad (9)$$

که در این روابط به ترتیب CWU_{green} و CWU_{blue} جزء آب آبی و جزء آب سبز محصول و Y عملکرد محصولات کشاورزی می‌باشد. اجزای مصرف آب محصول (CWU) سبز و آبی نیز از مجموع تبخیر و تعرق روزانه در تمام دوره رشد یک گیاه به‌صورت روابط (۱۰) و (۱۱) محاسبه می‌گردند.

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

محصولات، ردپای آب زیرزمینی، تنش وارده به آب‌های زیرزمینی و شدت مصرف آب و بهره‌وری محصول در حالت عادی (راندمان ۳۶٪ در منطقه) را نشان می‌دهد. مطابق نتایج به‌دست آمده، در بین محصولات مورد بررسی بیشترین مقدار ردپای آب سبز مربوط به دو محصول گندم و جو به ترتیب با مقدار ۸۹۰/۹ و ۱۳۸۲/۶ مترمکعب بر تن می‌باشد. علت بالا بودن ردپای آب سبز این دو محصول، پایین بودن عملکرد و همچنین تاریخ کشت و طول دوره رشد آنها بوده به‌طوری‌که عمدتاً فصل‌های پر بارش (فصل‌های پاییز، زمستان و بهار) را در بر می‌گیرند و این در حالی است که طول دوره رشد سایر محصولات عمدتاً فصل‌های بهار و تابستان را در بر می‌گیرد و کمتر از بارش‌های جوی برای تغذیه استفاده می‌نمایند. در بررسی ردپای آب آبی محصولات نیز چهار محصول گندم، جو، لوبیا و یونجه بیشترین مقدار را به ترتیب با ۱۸۲۳/۳، ۲۱۲۶/۱، ۳۰۷۸/۲ و ۱۷۸۳/۶ مترمکعب بر تن دارا می‌باشند که علت این امر نیز طول دوره رشد طولانی این محصولات و پایین بودن عملکرد جرمی این محصولات نسبت به سایر محصولات مورد بررسی در این پژوهش می‌باشد. شاخص ردپای آب کل نیز که حاصل جمع ردپای آب آبی و ردپای آب سبز محصولات می‌باشد، با توجه به نتایج حاصل از هر دو جزء آب آبی و آب سبز بیشترین مقدار را برای دو محصول گندم و یونجه نشان داد. این نتایج با نتایج به‌دست آمده توسط روحانی و همکاران (۱۳۸۷)، رسولی مجد و همکاران (۱۳۹۴) و علیقلی‌نیا و همکاران (۱۳۹۴) که محصولات گروه غلات را به عنوان پرمصرف‌ترین محصولات در ایران و رحمانی و همکاران (۱۳۹۴) که محصولات زراعی و به‌ویژه غلات را محصولاتی با بیشترین ردپای آب در حوضه دریاچه ارومیه، معرفی کرده‌اند؛ مطابقت کامل دارد.

می‌شود. در این پژوهش از متوسط دوره آماری مشترک ۱۰ ساله (۱۳۹۳-۱۳۸۴) داده‌ها و اطلاعات هواشناسی و کشاورزی آن برای محاسبات ردپای آب محصولات، ردپای آب زیرزمینی و تنش وارده بر آنها استفاده گردید. لازم به ذکر است که به‌منظور بررسی تأثیر عوامل مؤثر در ایجاد و بروز تنش بر آبهای زیرزمینی در کشت محصولات، ابتدا محاسبات برای شرایط موجود با راندمان ۳۶٪ (دهقان و همکاران، ۱۳۹۲) در منطقه انجام شد و سپس با تغییر راندمان آبیاری و افزایش آن به میزان ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد، محاسبات تکرار شد. جهت انجام محاسبات نیز برخی از مهمترین محصولات زراعی که با توجه به میزان کاشت، تولید، مصرف آب و عرف کشاورزی حاکم در منطقه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بودند، انتخاب گردیدند. همچنین به منظور محاسبه تبخیر و تعرق و نیاز آبی از نرم افزار CROPWAT استفاده گردید. در این مدل، معادله فائو پنمن-مونتیث به عنوان روش استاندارد به منظور محاسبه نیاز آبی گیاه در نظر گرفته شده است.

نتایج و بحث

در این پژوهش ابتدا به ارزیابی ردپای آب محصولات، ردپای آب زیرزمینی، تنش وارده به آب‌های زیرزمینی و شدت مصرف آب و بهره‌وری محصول در حالت عادی بدون اعمال تغییر راندمان آبیاری پرداخته شد. سپس راندمان‌های آبیاری افزایش یافته و تأثیر افزایش راندمان در حالت‌های مختلف (۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد) بر میزان ردپای آب آبی و سبز محصولات مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت با نتایج به‌دست آمده از این بخش، اثرگذاری تغییر راندمان‌ها بر میزان ردپای آب زیرزمینی و تنش‌های وارده بر آنها مورد ارزیابی، بحث و بررسی قرار گرفت. جدول (۲) نتایج حاصل از بررسی ردپای آب

جدول ۲- ردپای آب محصولات، ردپای آب زیرزمینی، تنش وارده به آب‌های زیرزمینی، شدت مصرف آب و بهره‌وری محصولات در حالت عادی (بدون افزایش راندمان)

Table2- Product water footprint, groundwater footprint, groundwater stress, water consumption intensity and productivity in normal condition (without increasing efficiency)

محصولات	ردپای آب	ردپای آب	ردپای آب	تنش وارده به آب‌های	شدت مصرف	بهره‌وری
---------	----------	----------	----------	---------------------	----------	----------

محصول*** productivity	آب water consumption intensity	زیرزمینی groundwater stress	زیرزمینی** Ground WF	کل* Total WF	آبی* Blue WF	سبز* Green WF	Products
0.37	4.8	1.78	1522	2714.2	1823.3	890.9	گندم (Wheat)
0.29	0.2	0.08	68	3508.7	2126.1	1382.6	گوجه‌فرنگی (Tomato)
0.27	0.1	0.06	53	3637	3078.2	558.8	یونجه (Alfalfa)
3.69	0.1	0.07	56	271.2	250.4	20.7	ذرت (دانه‌ای و علوفه‌ای) (Corn (grains and fodder))
4.08	0.1	0.06	48	245	223.9	21.1	جو (barley)
5.19	1.5	0.85	727	192.6	189.3	3.2	لوبیا و نخود (Beans and peas)
0.48	6.8	2.80	2398	2081.1	1783.6	297.5	سیب‌زمینی (Potato)
8.94	0.5	0.27	231	111.84	108.51	3.33	چغندر قند (Sugar beet)
-	-	5.97	5104.46	-	-	-	جمع کل (Sum)

*** ارقام بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب

** ارقام بر حسب کیلومتر مربع

* ارقام بر حسب متر مکعب بر تن

ترتیب با ۱/۷۸ و ۲/۸ واحد، بیشترین تنش را به آب‌های زیرزمینی منطقه وارد می‌کنند. علت این پدیده، بالا بودن ردپای آب و همچنین بالا بودن سطح زیرکشت این دو محصول در منطقه مورد مطالعه بوده به‌طوری‌که مطابق جدول (۱) سطح زیرکشت این دو محصول به‌ترتیب برای گندم و یونجه ۱۵۷۱۳ و ۹۵۱۷ هکتار است و در بین سایر محصولات مورد بررسی، بیشترین سطح زیرکشت را دارا می‌باشند. این درحالی است که سایر محصولات با وجود نیاز آبی بیشتر نسبت به دو محصول گندم و یونجه (جدول-۱)، به‌دلیل سطح زیرکشت کمتر، هیچگونه تنش معنی‌داری به آب‌های زیرزمینی منطقه وارد نمی‌کنند و شاخص تنش آنها کمتر از یک به‌دست آمده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که عامل اصلی در تنش وارده به آب‌های زیرزمینی توسط دو محصول گندم و یونجه، سطح زیرکشت بالای این دو محصول بوده و عملاً بیانگر این نکته می‌باشد که منطقه مورد مطالعه، پتانسیل گسترش سطح زیرکشت این محصولات را نداشته و برای کاهش تنش‌های وارده بر آب‌های زیرزمینی باید سطح زیرکشت محصولات فوق به کمتر از حد کنونی برسد. شاخص شدت مصرف آب نیز برای دو محصول گندم و یونجه بیشترین مقدار را نشان می‌دهد که این امر نیز با توجه

از دیگر شاخص‌های مورد بررسی در این پژوهش شاخص ردپای آب زیرزمینی و تنش وارده بر آب‌های زیرزمینی با شاخص فوق می‌باشد. بدیهی است با افزایش مقدار ردپای آب زیرزمینی، میزان تنش وارده نیز افزایش و با کاهش آن، میزان تنش وارده بر آب‌های زیرزمینی کاهش خواهد یافت. مطابق آنچه که قبلاً ذکر شده بود شاخص ردپای آب زیرزمینی نشان‌دهنده مساحت مورد نیاز برای استفاده پایدار از آب زیرزمینی و اکوسیستم‌های وابسته به آن است و شاخص تنش وارده بر ردپای آب زیرزمینی، بیانگر وجود تنش یا عدم تنش در آب‌های زیرزمینی توسط محصولات می‌باشد، به طوری‌که اگر عدد به‌دست آمده از محاسبه این شاخص یک یا بیشتر از آن باشد نشان‌دهنده وجود تنش و اگر کمتر از ۱ واحد باشد، حاکی از عدم وجود تنش در آب‌های زیرزمینی توسط محصولات می‌باشد. بر اساس نتایج جدول (۲) مقدار شاخص ردپای آب زیرزمینی برای تمامی محصولات مورد بررسی در دشت ارومیه ۵۱۰۴/۴۶ کیلومتر مربع و مقدار تنش وارده بر آب‌های زیرزمینی ۵/۹۷ واحد به‌دست آمد که این نتایج حاکی از وجود تنش نسبتاً بالایی در آب‌های زیرزمینی منطقه می‌باشند. در بین محصولات مورد بررسی شاخص تنش دو محصول گندم و یونجه بیشتر از یک واحد بوده و به

راندمان در حالت‌های مختلف (افزایش ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصدی) در ردپای آب محصولات و در نهایت در شاخص ردپای آب زیرزمینی و شاخص تنش وارده به آب‌های زیرزمینی پرداخته شد. جدول (۳) نتایج حاصل از تغییر ردپای آب محصولات در دو جزء آب آبی و سبز تحت تأثیر افزایش راندمان آبیاری را نشان می‌دهد. مطابق جدول (۳) با افزایش راندمان آبیاری میزان ردپای آب آبی و سبز در تمامی محصولات کاهش یافته اما میزان کاهش در محصولات مختلف متفاوت است که این امر به دلیل متفاوت بودن ردپای آب هر محصول، عملکرد در واحد سطح و شرایط رشد و طول دوره رشد هر محصول می‌باشد.

به نتایج به دست آمده از ردپای آب و تنش وارده بر آب‌های زیرزمینی برای این دو محصول، منطقی است. بنابراین می‌توان گفت تنش وارده بر آب‌های زیرزمینی توسط محصولات کشاورزی، ماحصل تأثیر عوامل مختلفی از قبیل طول دوره رشد گیاه، میزان سطح زیرکشت، شرایط کشت و راندمان آبیاری، ردپای آب و بهره‌وری محصول بوده و تنها با نیاز آبی محصول نمی‌توان نتیجه گرفت که محصولی با نیاز آبی بیشتر، لزوماً بیشترین تنش را هم بر آب‌های زیرزمینی وارد خواهد کرد. به منظور بررسی بیشتر این موضوع در این پژوهش، راندمان آبیاری در کشت محصولات تغییر داده شد و با شبیه‌سازی انجام گرفته، به بررسی تأثیر افزایش

جدول ۳- ردپای آب آبی و سبز محصولات با افزایش راندمان آبیاری

Table 3- blue and green water Footprints of crops with increasing irrigation efficiency

%25		%20		%15		%10		محصولات Products
آب آبی (B WF)	آب سبز (G WF)	آب آبی (B WF)	آب سبز (G WF)	آب آبی (B WF)	آب سبز (G WF)	آب آبی (B WF)	آب سبز (G WF)	
1225.9	831.2	1335.7	842.4	1449.6	853.7	1566.8	864.7	گندم (Wheat)
1441.8	1318.8	1568	1330.7	1699.3	1343.1	1836	1356	گوجه‌فرنگی (Tomato)
1971.4	475.3	2163.9	489.5	2369	504.7	2588.2	521	یونجه (Alfalfa)
148.7	19	165.4	19.3	183.8	19.6	203.9	19.9	ذرت (دانه‌ای و علوفه‌ای) (Corn (grains and fodder))
144.9	17.9	158.9	18.5	173.7	19	189.3	19.6	جو (barley)
118.6	2.9	130.8	2.9	144	3	157.8	3.1	لوبیا و نخود (Beans and peas)
1070.3	253.1	1189.3	260.5	1318.5	265.8	1459.6	277.2	سیب‌زمینی (Potato)
67.5	3	74.5	3	81.9	3.1	90	3.1	چغندر قند (Sugar beet)

راندمان آبیاری، در محاسبات ردپای آب سبز فقط عملکرد در واحد سطح محصول، تغییر کرده و میزان آب مصرفی ثابت می‌باشد، چرا که میزان آب سبز صرفاً بر اساس بارندگی و رطوبت موجود در خاک بوده و آب آبیاری نقشی در محاسبات ردپای آب سبز ندارد، جدول (۴).

نکته قابل توجه در نتایج جدول (۳) این است که میزان تغییرات ردپای آب آبی محصولات با افزایش راندمان نسبت به ردپای آب سبز بیشتر است که دلیل این امر، تغییر همزمان میزان آب مصرفی و عملکرد در واحد سطح محصول با افزایش راندمان آبیاری در محاسبات ردپای آب آبی می‌باشد. این در حالی است که با تغییر

جدول ۴- ردپای آب زیرزمینی و تنش وارده به آب‌های زیرزمینی با افزایش راندمان

Table 4- Groundwater footprint and stress on groundwater with increasing efficiency

%25		%20		%15		%10		محصولات
-----	--	-----	--	-----	--	-----	--	---------

Products	ردپای آب زیرزمینی Ground WF	تنش وارده به آب‌های زیرزمینی* groundwater stress	ردپای آب زیرزمینی Ground WF	تنش وارده به آب‌های زیرزمینی* groundwater stress	ردپای آب زیرزمینی Ground WF	تنش وارده به آب‌های زیرزمینی* groundwater stress	ردپای آب زیرزمینی Ground WF	تنش وارده به آب‌های زیرزمینی* groundwater stress
گندم (Wheat)	1095.9	1.28	797	0.93	931.5	1.09	685	0.8
گوجه‌فرنگی (Tomato)	49.2	0.06	35.8	0.04	41.8	0.05	30.8	0.04
یونجه (Alfalfa)	38.3	0.04	27.9	0.03	32.6	0.04	23.9	0.03
ذرت (دانه‌ای و علوفه‌ای) (Corn (grains and fodder))	40.6	0.05	29.5	0.03	34.5	0.04	25.4	0.03
جو (barley)	34.5	0.04	25.1	0.03	29.3	0.03	21.6	0.03
لوبیا و نخود (Beans and peas)	523.5	0.61	380.7	0.45	445	0.52	327.2	0.38
سیب‌زمینی (Potato)	1726.5	2.02	1255.6	1.47	1467.5	1.72	1079.1	1.26
چغندر قند (Sugar beet)	166.7	0.19	121.2	0.14	141.7	0.17	104.2	0.12
جمع کل (Sum)	3675.5	4.30	2672.8	3.13	3123.9	3.65	2297	2.68

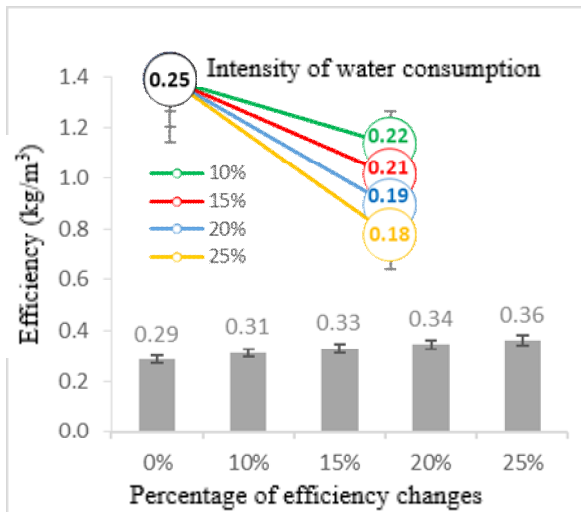
* ارقام برحسب کیلومتر مربع

مطابق جدول (۴) با افزایش راندمان آبیاری و به تبع آن کاهش ردپای آب محصولات، میزان ردپای آب زیرزمینی و تنش وارده بر آن نیز کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج جدول (۱) در حالت عادی (بدون تغییر راندمان و اعمال راندمان ۳۶٪ موجود در منطقه)، بیشترین تنش وارده بر آب‌های زیرزمینی مربوط به دو محصول گندم و یونجه به‌دست آمد. این میزان تنش با اعمال افزایش راندمان آبیاری در محاسبات هر دو محصول کاهش یافت؛ به طوری که با افزایش راندمان آبیاری به ۲۵٪ میزان شاخص تنش وارده بر آب‌های زیرزمینی برای محصول گندم به کمتر از یک واحد رسید. این در حالی است که در محصول یونجه، با اینکه با افزایش راندمان آبیاری میزان تنش کاهش یافته، اما حتی با افزایش ۲۵٪ راندمان آبیاری در این محصول، باز نمی‌توان تنش وارده توسط این محصول را بر آب‌های زیرزمینی از بین برد و میزان شاخص تنش را به عدد کمتر از یک واحد رساند. این امر در واقع بیانگر این موضوع می‌باشد که صرفاً با تغییر در راندمان آبیاری و اصلاح سیستم‌های آبیاری نمی‌توان مانع از بروز تنش بر آب‌های زیرزمینی توسط محصولات کشاورزی شد و این عامل را می‌توان فقط به عنوان یکی از عوامل مؤثر در میزان کاهش تنش دانست.

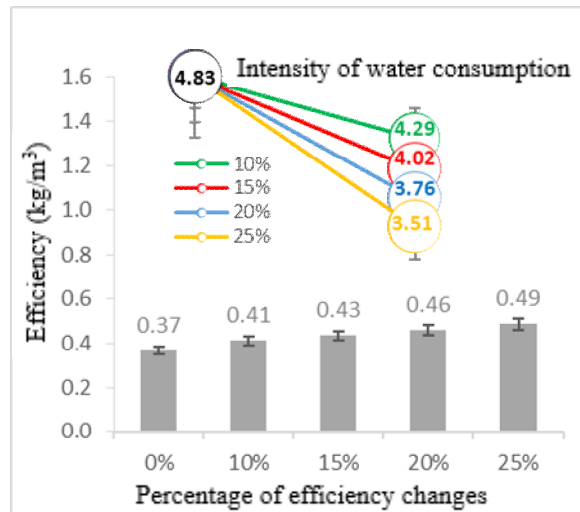
برای حرکت به سوی توسعه پایدار در صنعت کشاورزی و ایجاد تعادل بین بخش‌های مختلف محیط زیست، باید همه جانبه حرکت کرد و تمامی عوامل از قبیل اصلاح الگوی کشت، اصلاح (افزایش یا کاهش) سطح زیر کشت محصولات بر اساس پتانسیل منطقه و اصلاح نحوه کشت و زرع با بیشترین بازده را در کنار افزایش راندمان انجام داد و افزایش راندمان آبیاری را باید فقط یک راهکار مکمل به عنوان کاهش مصرف آب و افزایش بهره‌وری در کنار سایر عوامل مؤثر دانست. در این رابطه، به بررسی این ادعا و تأثیر افزایش راندمان در میزان شدت مصرف آب و بهره‌وری محصولات پرداخته شد. شکل (۲) نشان‌دهنده تغییرات شدت مصرف آب و بهره‌وری محصول تحت شرایط آبیاری با راندمان‌های مختلف می‌باشند که نمودارهای میله‌ای خاکستری نشان‌دهنده بهره‌وری محصول و نمودارهای خطی رنگی نشان‌دهنده شدت مصرف آب هر یک از محصولات در راندمان‌های مختلف می‌باشد. مطابق شکل مذکور با افزایش راندمان آبیاری، شدت مصرف آب تمامی محصولات کاهش و به تبع آن میزان بهره‌وری محصولات افزایش یافته است. میزان تغییرات با توجه به ماهیت محصولات متفاوت بوده اما افزایش بهره‌وری و کاهش

کمکی در کنار سایر عوامل بوده و می‌تواند با افزایش تولید و بهره‌وری در کشاورزی در بهبود وضعیت اقتصادی کشاورزان نقش مؤثر داشته و از این طریق راه را برای انجام سایر اقدامات لازم (اصلاح الگوی کشت و کاهش سطح زیر کشت در صورت لزوم) جهت اجرای امر توسعه پایدار هموار نماید.

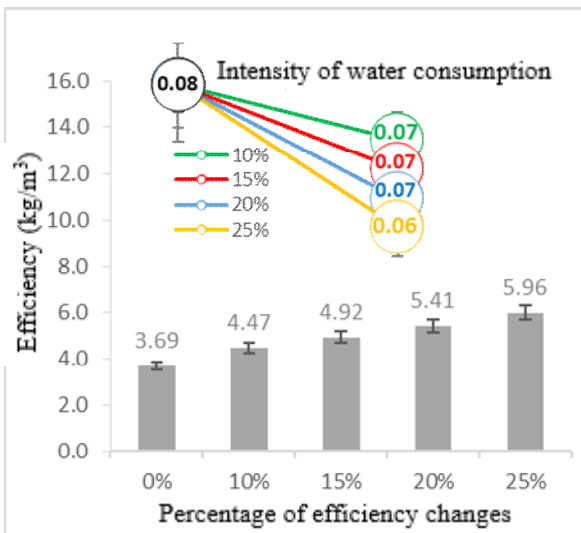
شدت مصرف آب تمامی محصولات حاکی از بهبود وضعیت کشاورزی با افزایش راندمان و به تبع آن بهبود وضعیت تولید در بخش کشاورزی خواهد بود. اما همانطور که قبلاً اشاره گردید این عامل به‌تنهایی از بین برنده تنش‌های وارده از بخش کشاورزی به محیط زیست و به خصوص منابع آب-های زیرزمینی نخواهد بود و فقط لذا به عنوان یک عامل



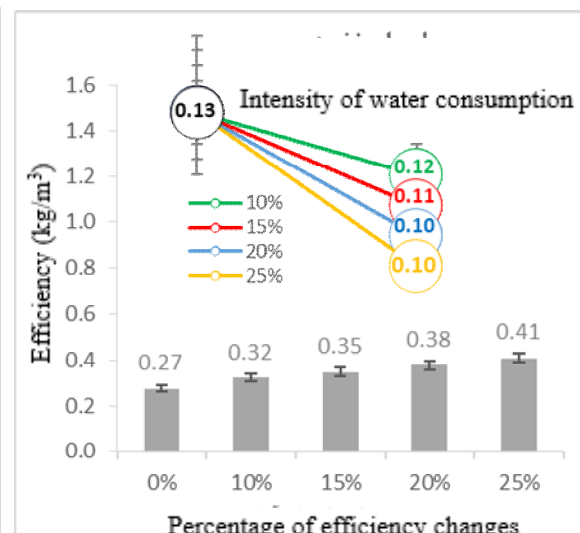
(ب) (ب)



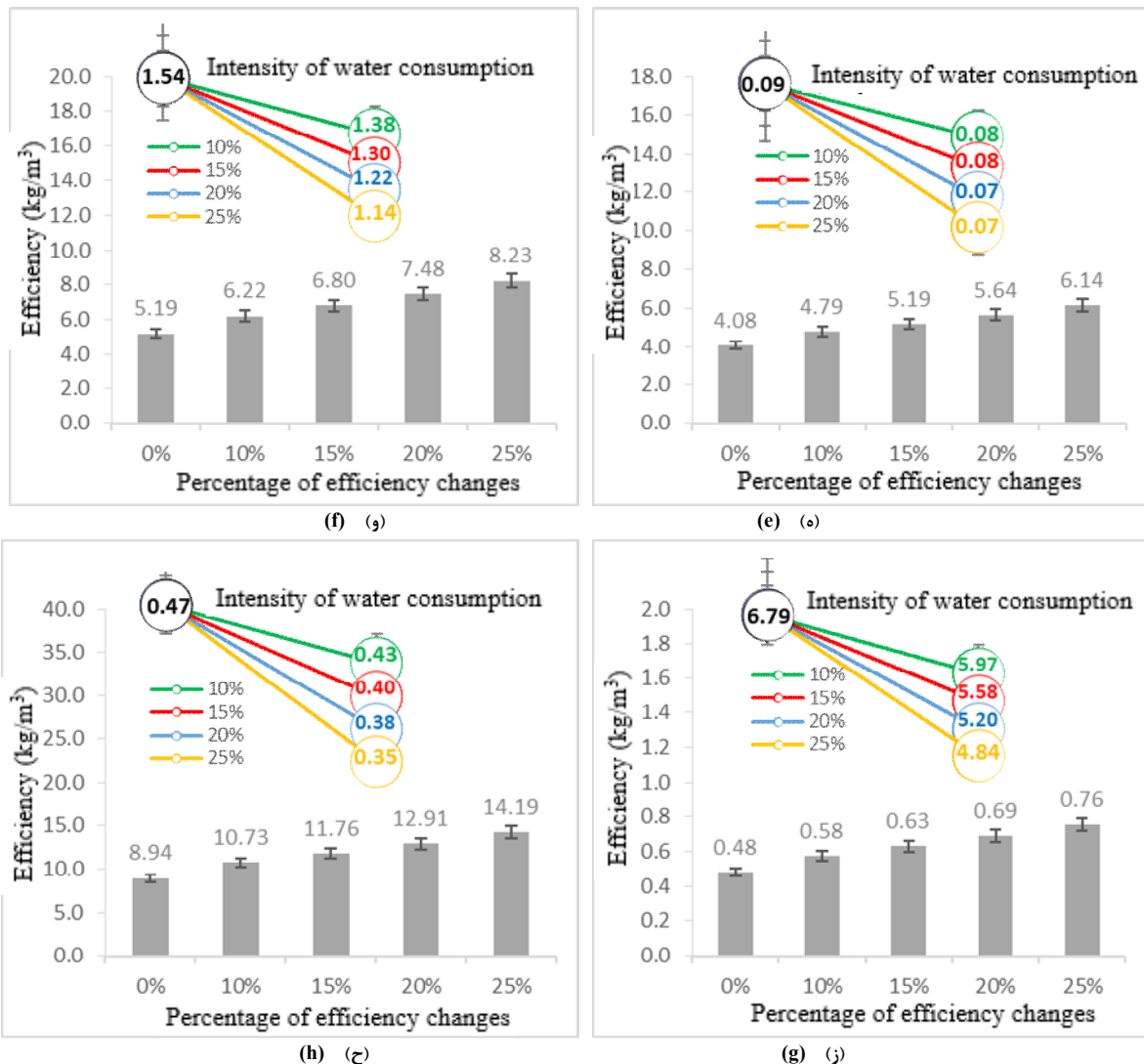
(الف) (ا)



(د) (د)



(ج) (ج)



شکل ۲- تغییرات بهره‌وری و شدت مصرف آب با افزایش راندمان آبیاری محصولات، گندم (الف)، جو (ب)، لوبیا و نخود (ج)، چغندر (د)، سیب‌زمینی (ه)، گوجه‌فرنگی (و)، یونجه (ز) و ذرت (ح).

Figure 2- Changes in water Efficiency and intensity with increasing irrigation efficiency of crops, wheat (a), barley (b), beans and chickpeas (c), sugar beet (d), potato (e), tomato French (f), alfalfa (g) and corn (h).

نتیجه‌گیری

باعث کاهش تنش وارده به آب‌های زیرزمینی می‌شود اما این عامل به تنهایی نمی‌تواند فشارهای وارده بر آب‌های زیرزمینی را به کلی از بین ببرد و تنش حاصل از کشت محصولات کشاورزی را به سطح نرمال برساند. بنابراین لزوم توجه به اصلاح الگوی کشت و پایین‌آوردن سطح زیرکشت محصولات متناسب با پتانسیل منطقه، امری بدیهی است به طوری که بدون توجه به این عوامل، توسعه

بررسی نتایج، حاکی از وجود تنش نسبتاً بالا در آب‌های زیرزمینی منطقه توسط محصولات کشاورزی بوده که این تنش ناشی از عوامل مختلفی از قبیل سطح زیر کشت بالای محصولات، راندمان پایین آبیاری، عدم وجود الگوی کشت مناسب و همچنین عدم برنامه‌ریزی مناسب و یکپارچه در بخش کشاورزی است. نتایج حاصل از تغییر راندمان آبیاری نیز نشان داد که افزایش راندمان

به دست آمده و توضیحات ارائه شده، پیشنهاد می‌گردد ابتدا مطالعات همه جانبه در رابطه با پتانسیل‌های طبیعی هر منطقه، اصلاح الگوی کشت، اصلاح و بهبود سیستم‌های آبیاری و مکان‌یابی برای کشت محصولات صورت گیرد و انجام اقدامات لازم جهت افزایش بهره‌وری در واحد سطح محصولات، مورد بررسی واقع شده و سپس اقدامات لازم با در نظر گرفتن سیاست‌های اقتصادی دولت و کشاورزان صورت پذیرد.

پایدار در منطقه اتفاق نمی‌افتد. همچنین باید به این نکته همواره توجه داشت که توسعه پایدار با استفاده پایدار و منطقی از پتانسیل‌های طبیعی، اتفاق می‌افتد، بنابراین می‌توان گفت که در منطقه مورد مطالعه صرفاً افزایش راندمان آبیاری و توسعه و گسترش تجهیزات کشاورزی بدون توجه به پتانسیل منطقه و انجام مطالعات بنیادی در بخش کشاورزی کاری ناقص بوده و فقط منجر به صرف هزینه‌های مالی بالا و اتلاف انرژی و نیروی انسانی و کاری خواهد بود. لذا در این پژوهش با توجه به نتایج

منابع:

1. Agricultural Statistics. (2006-2015). Ministry of Agriculture, Deputy of Planning and Economy, Information and Communication Technology Center. Volume One, Crops. 10-26.
2. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, 1998, ISBN 92(5):104-119.
3. Aligholinia, T., Rezaie, H., Behmanesh, j and Montaei, M. (2016). Sustainable management of water resources in order to maximize extractable water with a water footprint approach. Master Thesis, Faculty of Agriculture, Urmia University.
4. Dehgan. A., Zabihi Afrooz. R., Hosseini Sabet, M. (2013). Productivity of crops in exchange for water consumption in Iran and its comparison with other countries. A series of reports related to the Agricultural Economics and Rural Development Planning Research Institute.
5. Esnault, L., Gleeson, T., Wada, Y., Heinke, J., Gerten, D., Flanary, E., Bierkens, M.F. and van Beek, L.P. 2014. Linking groundwater use and stress to specific crops using the groundwater footprint in the Central Valley and High Plains aquifer systems, US. Water Resources Research, 50(6):4953-4973.
6. FAO. (2005-2014) 'FAOSTAT database', FAO, Rome, <http://faostat.fao.org>.
7. Farspand Ab Consulting Engineers. (2010). Water Balance Update Project of Urmia Lake Basin Study Areas (Urmia Study Area Water Balance Report). West Azerbaijan Regional Water Company, Office of Basic Studies of Water Resources.
8. Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M.F. and van Beek, L.P. (2012). Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. Nature, 488(2012):197-200.
9. Gleeson, T. and Wada, Y. (2013). Assessing regional groundwater stress for nations using multiple data sources with the groundwater footprint. Environmental Research Letters, 8(4):44-64.
10. Hoekstra, A.Y., Hung, P.Q. (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, UNESCO/IHE, Delft, The Netherlands, www.waterfootprint.org/Reports/Report11.
11. Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M. & Mekonnen, M. M. (2011). The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard (Earthscan).
12. Kourgialas, N. N., Karatzas, G. P., Dokou, Z., & Kokorogiannis, A. (2018). Groundwater footprint methodology as policy tool for balancing water needs (agriculture &

tourism) in water scarce islands-The case of Crete, Greece. *Science of the Total Environment*, 615: 381-389.

13. Masoudi, M., Barzegar, s. (2015). Assessment and Mapping of Qualitative and Quantitative Severity Degradation of Groundwater Resources using the Modified IMDPA Desertification Model and GIS. A Case Study: Firuz-abad Plain of Fars province. *Irrigation and Water Engineering*, 5(4), 86-95.

14. Obuobie, E., Gachanja, P. M., & Dörr, A. C. (2005). The role of green water in food trade. Bonn: Zentrum für Entwicklungs Forschung (ZEF) (Term paper for the interdisciplinary course, International Doctoral Studies).

15. Perez, A. J., Hurtado-Patiño, J., Herrera, H. M., Carvajal, A. F., Perez, M. L., Gonzalez-Rojas, E., & Perez-García, J. (2019). Assessing sub-regional water scarcity using the groundwater footprint. *Ecological Indicators*, 96: 32-39.

16. Rahmani, N., Rezaei, H. and Montaseri, M. (2016). Study and evaluation of fluctuations in the water level of Lake Urmia with water footprints of agricultural products. Master Thesis, Faculty of Agriculture, Urmia University.

17. Rasouli Majd, N., Montaseri, M., Behmanesh, J and Rezaei, H. (2016). Identify the evaluation of blue, green and gray water

footprint index by applying climate change. Master Thesis, Faculty of Agriculture, Urmia University.

18. Ringersma, J. (2003). Optimizing Green Water Use and Improved Crop Water Productivity under Rain Fed Agriculture in Sub-Sahara Africa. ISRIC Abstract of a Data Search and Literature Study.

19. Rizzo, D. M., and J.M. Mouser. 2000. Evaluation of Geostatistics for Combined Hydrochemistry and Microbial Community Fingerprinting at a Waste Disposal Site.

20. Rouhani, N., Yang, H., Amin Sichani, S., Afyuni, M., Mousavi, S. and Kamgar Haghighi, A. (2009). Assessment of Food Products and Virtual Water Trade as Related to Available Water Resources in Iran. *JWSS*. 2009; 12 (46):417-432

21. Soltani, Gh and Zibaie, M. (2011). Agricultural water consumption management is a challenge to deal with drought. Conference on water consumption optimization in the country. Academy of Sciences. Iran.

22. Thapinta, A. and P. Hudak. 2003. Use of geographic information systems for assessing groundwater pollution potential by pesticides in Central Thailand. *Environmental International Journal*, 29: 87-93.

23. Wackernagel, M. & Rees, W. 1996. *Our Ecological Footprint* (New Society Publishers).



Original Article:

Investigation of groundwater stress using groundwater footprint indicator in agricultural products

Tohid Aliqlinia¹, Monireh Faghani^{2*}, Khalil Ghorbani³

1- PhD in Water Science and Engineering, Expert in Aquatic Habitats of West Azerbaijan Department of Environment, Urmia, Iran.

2- PhD in Water Science and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

3- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

*Corresponding Author E-mail: monir.faghani@yahoo.com

Received: 12-09-2020; Accepted: 17-05-2021

Abstract

Agricultural activities have grown more due to population growth and increasing demand for more products in the Urmia plain in recent years and have mainly been expanded with groundwater withdrawal, and because of the limited availability of surface water resources, this issue has led to a sharp drop in groundwater resources in the area. In this research, the groundwater footprint indicator was used to study the agricultural products' effect on groundwater stresses. For this purpose, eight crops were selected, and the indices of water footprints, groundwater footprints, groundwater stresses, water use intensity, and efficiency were calculated. The results showed that the groundwater footprint indicator and the stress on groundwater resources for all studied products in Urmia plain were respectively 464.5 km² and 5.97 units. Among the studied crops, wheat and alfalfa put the most stress on the groundwater of the region with 1.78 and 2.8 units, respectively. By increasing the irrigation efficiency to 25%, the stress index applied to groundwater for wheat yield became less than 1 unit. The study results on the water use intensity and products' efficiency also showed that water consumption decreases with increasing efficiency, and products' efficiency increases. However, increasing irrigation efficiency alone will not eliminate the entire stresses on the agricultural sector, the environment, and in particular, groundwater resources, and it is only an additional factor along with other factors.

Keywords: Productivity, Urmia Plain, Underground Water Footprint, Water use Intensity.