اکوهیدرولوژی

دورهٔ ۴، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۳۹۶، ص ۵۳۲-۵۲۳

انتخاب بهترین استان در تولید سیب‌زمینی از طریق ارزیابی شاخص رد پای آب

علی محمدی[۱]، حسین یوسفی[۲*]، یونس نوراللهی[۳]، سیدجواد ساداتی‌نژاد[۴]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی اکوهیدرولوژی، دانشکدهٔ علوم و فنون نوین دانشگاه تهران

۲. استادیار دانشکدهٔ علوم و فنون نوین دانشگاه تهران

۳ و ۴. دانشیار دانشکدهٔ علوم و فنون نوین دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۱۰/۱۰؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۵/۱۲/۲۶)

چکیده

رد پای آب به‌عنوان شاخصی برای تخصیص منابع آب شیرین تعریف شده است که بینش ارزشمندی دربارهٔ آثار محیط زیستی تولید یک محصول ارائه می‌کند. هدف از انجام این پژوهش، تعیین مناسب‌ترین استان کشور برای تولید محصول سیب‌زمینی از جنبهٔ مصرف آب شیرین بوده است که بدین‌منظور از شاخص رد پای آب استفاده شد. برای دستیابی به این هدف، ابتدا اطلاعات مربوط به سطح برداشت، تولید و عملکرد محصول در استان‌های اصلی تولیدکننده برای سال زراعی ۱۳۹۳ـ ۱۳۹۴ جمع‌آوری شد. سپس برای محاسبهٔ رد پای آب در هر استان، اطلاعاتی نظیر نیاز آبی محصول و بارش مؤثر به تفکیک استان جمع‌آوری و در نهایت اجزای رد پای آب محاسبه شد. نتایج پژوهش نشان داد به‌ترتیب رد پای آب سبز، آبی و خاکستری بیشترین سهم را در تولید سیب‌زمینی همهٔ استان‌ها به خود اختصاص دادند. با توجه به رد پای آب کل محاسبه‌شده، استان همدان بهترین منطقه برای کاشت سیب‌زمینی و استان سمنان نامناسب‌ترین منطقه از دیدگاه شاخص یادشده شناخته شدند. میانگین رد پای آب تولید سیب‌زمینی در سطح کشور نزدیک به ۵۲۷ مترمکعب بر تن محاسبه شد. با توجه به شاخص رد پای آب و مقدار تولید محصول در هر استان، مشخص شد که در سال زراعی مطالعه‌شده، استان همدان با مصرف ۳۳۸ میلیون مترمکعب و استان خراسان شمالی با مصرف ۱۸ میلیون مترمکعب آب، به‌ترتیب بیشترین و کمترین مقدار از منابع آبی خود را به تولید این محصول کشاورزی اختصاص داده‌اند.

کلیدواژگان: ارزیابی رد پای آب، منابع آب، مصرف آب، نیاز آبی.

* نویسندهٔ مسئول

Email: Hosseinyousefi@ut.ac.ir

مقدمه

کشاورزی فعالیتی است که مصرف آب بسیار زیادی دارد و با توجه به تغییرات اقلیمی که در حال وقوع است، ممکن است نیاز آبی محصولات افزایش [۱ و ۲] و امنیت غذایی کاهش نیز یابد [۳ـ ۵]. علاوه بر این، فعالیت کشاورزی تأثیرات مهمی بر کمیت و کیفیت آب داشته و در نتیجه این موضوع، سنجه‌های مختلفی برای ارزیابی آثار محیط زیستی مصرف آب دربارهٔ سیستم‌های تولیدی در کشاورزی بررسی و استفاده شده است [۶]. تا کنون چندین روش برای ارزیابی و پایش پایدار رد پای محیط زیستی[1] گزارش شده است [۷]. یکی از این روش‌ها یا شاخص‌های کاربردی که معرفی شده است، شاخص رد پای آب نام دارد. مفهوم رد پای آب که توسط هوکسترا معرفی شد، چارچوب مناسبی برای بررسی ارتباط بین مصرف انسان و تخصیص منابع آب شیرین فراهم کرد. رد پای آب به‌عنوان شاخصی تعریف شده است که حجم آب مصرفی برای تولید نوعی محصول در همهٔ مراحل تولید را بررسی می‌کند [۸]. رد پای آب کل، شامل همهٔ رد پای آبی است که در مراحل تولید کالا به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم مصرف می‌شود و این رد پای آب به‌صورت مقدار آب مصرفی برای تولید یک واحد از نوعی کالا برحسب مترمکعب بر تن بیان می‌شود [۹].

بنا بر تعریف مکانن و هوکسترا [۹] از اصلاح تخصیص منابع آب، چنین برداشت می‌شود که این اصطلاح دربارهٔ استفاده از آب به‌صورت رد پای آب آبی، سبز و خاکستری است. رد پای آب آبی به مقدار آب سطحی و زیرزمینی اشاره دارد که برای تولید نوعی کالا استفاده می‌شود. رد پای آب سبز مقدار آب مصرفی توسط گیاه است که به‌صورت رطوبت در خاک وجود دارد و به استفادهٔ گیاه می‌رسد و رد پای آب خاکستری نیز مقدار آبی است که بر اثر فرایند تولید توسط آلاینده‌ها کیفیت خود را از دست داده و به نوعی مصرف شده است [۹].

تفاوت میان این رد پاهای آب بسیار شایان توجه است. به‌طور کلی، رد پای آب سبز، آبی است که جایگزینی برای استفادهٔ آن وجود ندارد و یا بسیار کم است بدین‌معنا که فقط در طبیعت امکان جابه‌جایی آن وجود دارد در حالی که رد پای آب آبی در بخش‌های مختلفی مثل صنعت، شرب و کشاورزی در حال انتقال و استفاده است. رد پای آب را از جنبه‌های مختلفی می‌توان بررسی کرد. برای مثال، از نظر وسعت، محدودهٔ مطالعه می‌تواند یک حوضهٔ آبخیز، یک شهر، یک استان، کشور و یا کل جهان باشد و از لحاظ نوع کالا، می‌تواند شامل محصولات صنعتی، دامی و کشاورزی باشد. رد پای آب در بخش کشاورزی، مصرف آب یک محصول را در طول دورهٔ کاشت نشان می‌دهد؛ بیشتر مصرف آن نیز از طریق تبخیر و تعرق است [۱۰].

برای بررسی تأثیر تولید بر مقدار کمبود آب منطقه، باید مقدار برداشت منابع آب آبی با توجه به منابع آب موجود در محل بررسی شود یعنی جایگزینی تولید یک کالا با آب‌بری کم به جای کالایی با آب‌بری زیاد، سبب افزایش پایداری آن منبع آب برای تولید کالای مطلوب می‌شود [۱۱]. رد پای آب را می‌توان از راه‌های مختلفی مثل افزایش بازده محصول، استفاده از سیستم‌های آبیاری کارآمد (مثل آبیاری قطره‌ای)، کاهش تبخیر و تعرق (به‌طور مثال، با استفاده از مالچ[2])، کاهش هدررفت کود، افزایش استفادهٔ مؤثر از بارش، بهینه‌سازی کاشت محصول و انتخاب محصولات زراعی با عملکرد بیشتر، کاهش داد [۱۲ و ۱۳].

تا کنون مطالعات متعددی در زمینهٔ بررسی رد پای آب محصولات مختلف انجام شده است. از جمله مکانن و هوکسترا [۱۴] رد پای آب آبی، سبز و خاکستری محصولات زراعی تولیدی را در مقیاس جهانی بررسی کردند و رد پای آب محصول سیب‌زمینی را به‌طور متوسط ۲۸۷ مترمکعب بر تن مشخص کردند. لو و همکارانش [۱۵] در تحقیقی برای بررسی ۳۵ سالهٔ تغییرات رد پای آب و بهره‌وری مصرف آن در غلات تولیدی شمال چین (شامل ذرت تابستانه و گندم زمستانه)، به جمع‌آوری اطلاعات از سایت‌های مستقر در مزرعه اقدام کردند. نتایج مطالعهٔ ایشان نشان داد رد پای آب آبی طی این مدت در این منطقه یک شیب صعودی داشته است بدین‌معنا که تولید این دو محصول در این منطقه در گذر زمان، به‌شدت به آبیاری مستقیم وابسته شده است. همچنین با افزایش مصرف کودهایی از جمله کود ازت و پتاسیم که در این مطالعه بررسی شدند، رد پای آب خاکستری تولیدی محصولات نسبت به سال‌های گذشته بسیار افزایش یافته است.

1. Environmental Footprint

2. Mulch

ژائو و همکارانش [۱۲] رد پای آب سبز، آبی و خاکستری را برای حوضهٔ رودخانهٔ زرد چین طی دورهٔ زمانی ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۹ بررسی کردند. نتایج مطالعهٔ آنها نشان داد مجموع رد پای آب سبز و آبی به‌علت بهبود در بازده محصولات کاهش یافته، ولی به دلیل رونق در مصرف کود، رد پای آب خاکستری محصولات افزایش یافته است. همچنین ایشان نشان دادند به‌علت افزایش سطوح زیر کشت به‌صورت آبیاری مستقیم، نسبت رد پای آب آبی به رد پای آب سبز افزایش یافته است.

در تحقیقی توسط آبابایی و رمضانی اعتدالی [۱۶]، رد پای آب سه محصول ذرت، گندم و جو در ایران مطالعه شد. در این مطالعه اطلاعاتی از جمله مکان‌های اصلی تولید این محصولات، سطح زیر کشت آنها، مقدار تولید محصولات و مقدار بهره‌وری آنها استفاده شد. نتایج نشان داد رد پای آب سبز مربوط به تولید این محصولات در کشور، برای گندم و جو، به‌ترتیب ۲/۳ و ۱/۹ مرتبه بیشتر از رد پای آب آبی برای تولید این محصولات است. همچنین افزایش تولید به‌صورت دیم سبب کاهش در گسترش کشت آبی در مناطق مواجه با کمبود آب می‌شود که در نتیجهٔ این امر، نیاز به آب آبی کمتر از گذشته خواهد شد.

مکانن و هوکسترا [۹] رد پای آب محصولات زراعی را در مقیاس جهانی و برای بازهٔ زمانی ده‌ساله (۱۹۹۶ـ ۲۰۰۵) مطالعه و بررسی کردند. در این پژوهش ۱۲۶ محصول مطالعه شد. برای انجام این کار، از مدل تعادل پویای آب مبتنی بر شبکه استفاده شد. در این مدل توازن آب، خاک و شرایط اقلیمی برای هر سلول شبکه مد نظر قرار می‌گیرد. نتایج این پژوهش نشان داد در طول دورهٔ مطالعه، رد پای آب محصولات بررسی‌شده افزایش یافته است. در این بین رد پای آب محصول کتان با اختصاص ۴۰۲۹ مترمکعب بر تن و رد پای آب محصول نیشکر با اختصاص ۸۲۲ مترمکعب بر تن، به‌ترتیب بیشترین و کمترین رد پای آب را در بین کل محصولات مطالعه‌شده داشته‌اند.

شینس و هوکسترا [۱۷] در پژوهشی هر سه بخش رد پای آب (رد پای آب آبی، سبز و خاکستری) محصولات صنعتی، دامی و کشاورزی برای کشور مقدونیه را بررسی کردند. ایشان برای انجام این پژوهش حوضه‌های آبخیز کشور را به‌طور جداگانه مطالعه کردند؛ در واقع حوضه‌ها، محور انجام مطالعه قرار گرفتند. نتایج نشان داد کشت آبی محصولات زراعی و تبخیر آب از مخازن ذخیرهٔ آب، به‌ترتیب اولین و دومین منابع ازدست‌دادن آب در این کشور هستند. در بازهٔ زمانی انجام مطالعه (۱۹۹۶ـ ۲۰۰۵)، رد پای آب کل در بخش‌های کشاورزی، دامی، و صنعت به‌ترتیب ۲۹۷۱۹، ۶۶۶۳ و ۶۹ میلیون مترمکعب بوده است. در بخش کشاورزی که بیشترین رد پای آب را به خود اختصاص داده بود، محصول گندم پرمصرف‌ترین و محصول گوجه‌فرنگی کم‌مصرف‌ترین محصول از لحاظ رد پای آب شناخته شده‌اند.

با توجه به پیشینهٔ تحقیق ارائه‌شده، در بیشتر مطالعات، بخش کشاورزی و تولید محصولات زراعی، به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کنندهٔ منابع آب موجود شناخته شده است. بنابراین، بررسی رد پای آب در این بخش اهمیت ویژه‌ای خواهد داشت زیرا نیاز است تا اطلاعاتی در زمینهٔ مصرف مستقیم و غیرمستقیم آب و مقدار آلودگی ایجادشده توسط محصولات کشت‌شده جمع‌آوری شود تا مدیریت منابع آب موجود به بهترین شکل ممکن عملی شود. در این پژوهش، یکی از محصولات مهم زراعی، هم از لحاظ وجود در سبد تغذیه‌ای خانوار و هم از نظر سطح و مقدار تولید در کشور، انتخاب شد. کالای هدف، محصول سیب‌زمینی از خانوادهٔ سبزیجات است. براساس آمار [۱۸] در سال زراعی ۱۳۹۳ـ ۱۳۹۴، سطح زیر کشت این محصول ۱۶۰۲ کیلومترمربع و مقدار تولید آن ۲۴۲۶ هزار تن بوده است. در گروه سبزیجات از لحاظ سطح زیر کشت رتبهٔ نخست و از لحاظ مقدار تولید بعد از محصول گوجه‌فرنگی، رتبهٔ دوم را به خود اختصاص داده و از این دیدگاه برای مطالعه اهمیت ویژه‌ای دارد.

در کشور تا کنون مطالعات اندکی دربارهٔ رد پای آب انجام شده و به‌صورت تخصصی به رد پای آب محصولی خاص توجه نشده است؛ اما در این مطالعه به‌طور تخصصی به بررسی همهٔ اجزای رد پای آب محصول سیب‌زمینی در کشور پرداخته شد. در پژوهش پیش رو، رد پای آب محصول زراعی سیب‌زمینی به‌صورت کشت آبی در سال زراعی ۱۳۹۳ـ ۱۳۹۴، تجزیه و تحلیل شده است. علت انتخاب کشت آبی این محصول برای مطالعه، تفاوت بسیار بین کشت دیم و آبی این محصول است به‌طوری که سطح کشت آبی سیب‌زمینی در کل کشور ۱۵۹ کیلومترمربع است در حالی که سطح کشت دیم آن در کل کشور ۸ کیلومترمربع است.

مواد و روش‌ها

منطقهٔ مطالعه‌شده

برای انجام پژوهش حاضر، با توجه به گستردگی کشور و اینکه محصول مد نظر در بیشتر استان‌ها کشت می‌شود، کشور به پنج زون اصلی (شمال، جنوب، شرق، غرب و مرکز) تقسیم شد و در این قسمت‌ها، برای اینکه مناطق مطالعه‌شده تا حدی سطح کشور را پوشش دهند، دو استان انتخاب شد که نسبت به سایر استان‌های همان قسمت سطح زیر کشت بیشتری دارند (شکل ۱).

شکل ۱. موقعیت استان‌های مطالعه‌شده در سطح کشور

محاسبات رد پای آب

رد پاهای آب آبی، سبز و خاکستری محصول سیب‌زمینی با استفاده از چارچوب کاری ارائه‌شده توسط هوکسترا و چاپاگین [۱۹] و هوکسترا و همکارانش [۲۰] محاسبه شد. در این چارچوب، رد پای آب به‌عنوان شاخصی در نظر گرفته می‌شود که در آن تخصیص آب برای مصارف انسانی مد نظر قرار دارد و مصارف اکوسیستم در آن بررسی نمی‌شود [۲۱]. نیاز آبیاری و بارش مؤثر با استفاده از نرم‌افزار NETWAT که توسط سازمان هواشناسی کشور ارائه شده به‌دست آمد. این مدل نسخهٔ بومی‌شدهٔ مدل CROPWAT است که در آن تبخیر و تعرق گیاه براساس رابطهٔ پنمن-مانتیث و مقدار بارش مؤثر هم از مدل USDA-SCS گرفته شده است. در این اینجا، فرض بر آن است که آبیاری زمانی صورت می‌گیرد که ۵۰ درصد آب از دسترس گیاه خارج شده و رطوبت موجود در ناحیهٔ ریشه به مقدار ظرفیت زراعی رسیده است. رد پای آب کل محصولات از سه جزء رد پای آب آبی (WF_{blue}) و رد پای آب سبز (WF_{green}) و خاکستری (WF_{gray}) تشکیل و به‌صورت رابطهٔ ۱ تعریف شده است [۱۵].

$$WF = WF_{green} + WF_{blue} + WF_{gray} \quad (۱)$$

که در آن WF، رد پای آب محصول زراعی خاص (مترمکعب بر کیلوگرم) است.

رد پای آب سبز

مصرف آب در این دوره با توجه به محاسبهٔ تبخیر و تعرق گیاه در طول دورهٔ رشد، بررسی می‌شود که در نهایت به‌صورت عددی با واحد مترمکعب بر کیلوگرم بیان می‌شود. رد پای آب سبز محصول از طریق رابطهٔ ۱ محاسبه می‌شود [۲۱]:

$$WF_{green} = \frac{CWU_{green}}{Y} \quad (۲)$$

که CWU_{green} مقدار مصرف رد پای آب سبز گیاه در منطقه (مترمکعب بر کیلوگرم) و Y بازده محصول

(کیلوگرم بر هکتار) است. مقدار مصرف رد پای آب سبز گیاه براساس رابطهٔ ۳ تعیین می‌شود [۱۵]:

$$CWU_{green} = ۱۰ \times \sum_{d=۱}^{T} ET_{green} \quad (۳)$$

که در آن ضریب ده تبخیر و تعرق را از میلی‌متر (ارتفاع) به حجم آب در واحد زمین (مترمکعب بر کیلوگرم) تبدیل می‌کند. در این زمینه T طول مدت رشد گیاه در دورهٔ رشد d (روز) است. ET_{green} نیز نشان‌دهندهٔ تبخیر و تعرق آب سبز است. فرض دیگر در این محاسبه این است که فقط وقتی آب سبز موجود در خاک برای استفاده گیاه کافی نباشد، گیاه از آب آبی موجود استفاده می‌کند. از این‌رو، تبخیر و تعرق سبز گیاه (ET_{green}) از روش ارائه‌شده توسط هوکسترا و همکارانش [۱۵] به‌دست می‌آید:

$$ET_{green} = \min\left(ET_c,\ P_{eff}\right) \quad (۴)$$

که در آن ET_c مقدار تبخیر و تعرق گیاه و P_{eff} نیز نشان‌دهندهٔ مقدار بارش مؤثر است. نیاز آبی گیاه از مقدار بارش، دما، فشار هوا، سرعت باد، نوع گیاه، شرایط خاک و زمان کاشت تأثیر می‌پذیرد.

رد پای آب آبی

رد پای آب آبی تقریباً همانند رد پای آب سبز محاسبه می‌شود با این تفاوت که تبخیر و تعرق آب آبی (ET_{blue}) به‌صورت رابطهٔ ۷ محاسبه می‌شود [۱۵ـ ۲۱]:

$$WF_{blue} = \frac{CWU_{blue}}{Y} \quad (۵)$$

$$CWU_{blue} = ۱۰ \times \sum_{d=۱}^{T} ET_{blue} \quad (۶)$$

$$ET_{blue} = \max\left(۰,\ ET_c - P_{eff}\right) \quad (۷)$$

که CWU_{blue} مقدار مصرف رد پای آب آبی گیاه در منطقه (مترمکعب بر کیلوگرم) و Y بازده محصول (کیلوگرم بر هکتار) است.

رد پای آب خاکستری

در این پژوهش، رد پای آب خاکستری نیز بررسی شد. بدین‌منظور فقط استفاده از کود ازته به‌عنوان منبع ایجاد آلودگی مطالعه شد. اطلاعات مربوط به میانگین میزان کاربرد کود ازته (NAR در کیلوگرم بر هکتار) از وزارت جهاد کشاورزی گرفته شد [۲۲ و ۲۳]. روش محاسبه بر اساس روش ارائه‌شده توسط چاپاگین و همکارانش [۲۴] و هوکسترا و همکارانش [۲۱] است. آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحدهٔ آمریکا (USEPA) با توجه به تحقیق چاپاگین و همکارانش [۲۴]، بیشترین غلظت مجاز نیتروژن در منابع آب سطحی و زیرزمینی را ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر توصیه کرده است. این استاندارد از زمانی به‌کار گرفته شد که آب‌های ناشی از فعالیت کشاورزی دوباره جمع‌آوری می‌شدند و بعد از انتقال به منابع اولیهٔ خود، در مصارف شهری استفاده می‌شدند. از این‌رو، لازم بود تا غلظت این عامل کمتر از یک آستانه قرار گیرد. از آنجا که هیچ‌گونه اطلاعاتی دربارهٔ غلظت طبیعی نیتروژن در آب و محیط در دسترس نبود، مقدار آن در این مطالعه صفر در نظر گرفته شد.

طبق توضیح ارائه‌شده، رابطهٔ استفاده‌شده برای محاسبهٔ رد پای آب خاکستری به‌صورت رابطهٔ ۸ ارائه می‌شود [۱۶]:

$$WF_{gray} = \frac{\alpha_{Irr} \times NAR_{Irr}}{C_{Max} - C_{Nat}} \times \frac{۱}{Yield_{Irr}} \quad (۸)$$

که در آن α، به‌صورت یک ضریب خاص در نظر گرفته شده است که با توجه به پژوهش راساد و همکارانش [۲۵]، این عدد برای محصول سیب‌زمینی ۲۵ درصد است. NAR_{Irr} مقدار مصرف کود ازته (کیلوگرم بر هکتار)، C_{Max}، بیشترین نیتروژن قابل قبول (میلی‌گرم بر لیتر)، C_{Min}، غلظت طبیعی نیتروژن (که برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود) و $Yield_{Irr}$، عملکرد محصول در کشت آبی (کیلوگرم بر هکتار) است.

یافته‌ها

میزان تولید محصول سیب‌زمینی در کشور حدود ۵/۱ میلیون تن برآورد شده است که معادل ۶/۶ درصد از میزان تولید محصولات زراعی و ۲۹/۶ درصد از کل میزان تولید سبزیجات است و ۹۹/۷ درصد آن اراضی با کشت آبی است [۱۸]. مجموع استان‌های مطالعه‌شده، بیش از ۶۰ درصد سطح برداشت و میزان تولید محصول سیب‌زمینی کشور را به خود اختصاص داده‌اند [۱۸].

در جدول ۱ اطلاعات مربوط به سطح زیر کشت، تولید و عملکرد محصول سیب‌زمینی در سطح استان‌های تولیدکننده ارائه شده است [۱۸].

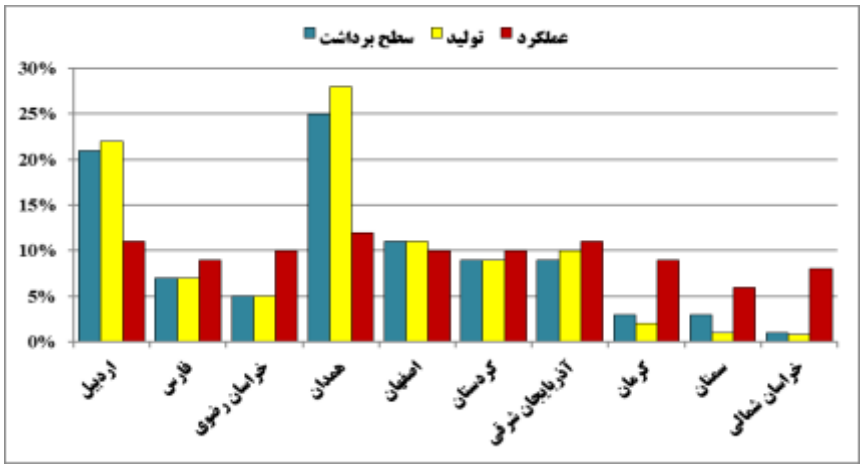
برای بهتر مشخص‌شدن وضعیت هر استان از لحاظ وضعیت سه عامل یادشده، سهم هر استان در تولید محصول سیب‌زمینی به‌صورت درصد در شکل۲ ارائه شد.

با توجه به شکل ۲، استان همدان در بین استان‌های

تولیدکنندهٔ محصول سیب‌زمینی، بیشترین مقدار سطح برداشت (۲۵درصد)، مقدار تولید (۲۸ درصد) و عملکرد (۱۲ درصد) را به خود اختصاص داده است. این در حالی است که استان سمنان در بین استان‌های مطالعه‌شده، کمترین سهم را در مقدار سطح برداشت (۳ درصد) و عملکرد (۶ درصد) داشته و استان خراسان شمالی نیز کمترین مقدار تولید (۱ درصد) را در بین استان‌ها به خود اختصاص داده است. در جدول ۲ مقدار کود شیمیایی مصرف‌شده (به‌طور میانگین برای هر استان) برای تولید محصول سیب‌زمینی مشخص شده است:

جدول ۱. مشخصات سطح برداشت، میزان تولید و عملکرد سیب‌زمینی در استان‌های مطالعه‌شده

استان	سطح برداشت (هکتار)	میزان تولید (تن)	عملکرد (کیلوگرم بر هکتار)
اردبیل	۲۲۳۱۶	۷۶۷۲۲۳	۳۴۳۷۹
فارس	۸۲۲۵	۲۴۲۵۸۲	۲۹۴۹۴
خراسان رضوی	۶۱۰۰	۱۹۳۷۰۶	۳۱۷۵۵
همدان	۲۶۱۲۷	۹۷۹۲۸۸	۳۷۴۸۱
اصفهان	۱۲۲۸۲	۳۷۹۵۶۳	۳۰۹۰۵
کردستان	۱۰۱۱۶	۳۱۸۴۰۸	۳۱۴۷۵
آذربایجان شرقی	۱۰۳۰۴	۳۴۱۸۱۶	۳۳۱۷۱
کرمان	۳۴۵۹	۹۸۱۱۷	۲۸۳۶۶
سمنان	۳۲۱۳	۶۲۱۱۲	۱۹۳۳۲
خراسان شمالی	۱۱۱۹	۲۷۴۹۶	۲۴۵۷۸



شکل ۲. مقایسهٔ سهم هر استان در سطح برداشت، تولید و عملکرد محصول سیب‌زمینی برحسب درصد

جدول ۲. میانگین مصرف کود ازته برای تولید محصول سیب‌زمینی

استان	میانگین مصرف کود شیمیایی (کیلوگرم بر هکتار)	استان	میانگین مصرف کود شیمیایی (کیلوگرم بر هکتار)
اردبیل	۳۹۶/۴	کردستان	۳۹۶/۳
فارس	۸۳۳/۲	آذربایجان شرقی	۴۶۸/۷
خراسان رضوی	۷۹۸/۱	کرمان	۴۰۲/۶
همدان	۴۵۳/۵	سمنان	۳۰۱/۷
اصفهان	۳۸۲/۷	خراسان شمالی	۳۱۹/۲
میانگین		۴۷۵/۲	

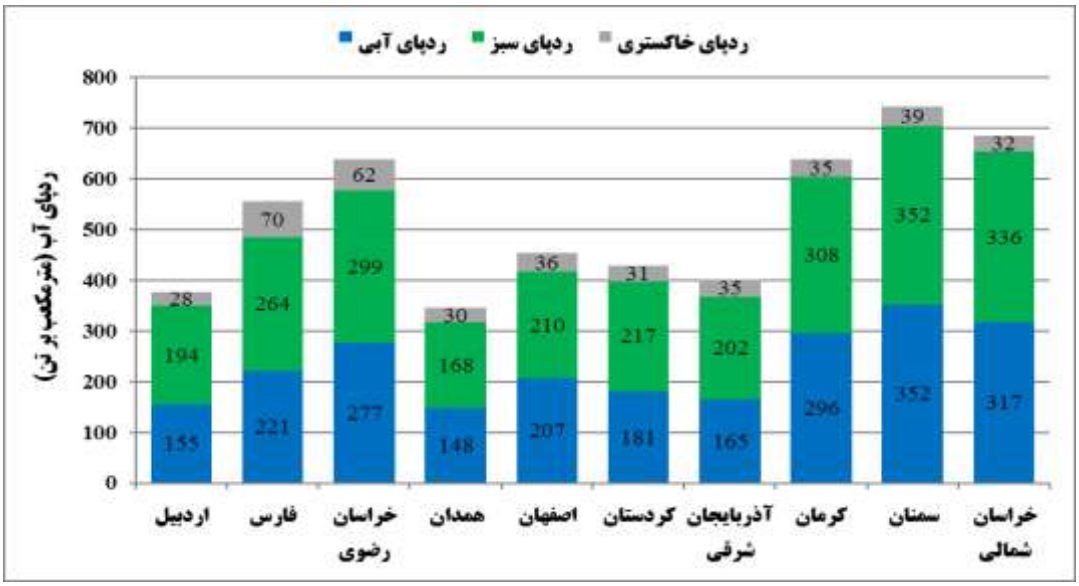
با توجه به جدول یادشده، بیشترین و کمترین میانگین مصرف کود شیمیایی (ازته) به‌ترتیب مربوط به استان فارس با مصرف ۸۳۳/۲ کیلوگرم کود در هر هکتار و استان سمنان با مصرف ۳۰۱/۷ کیلوگرم کود در هر هکتار است.

در جدول ۳ محاسبات مربوط به رد پای آب محصول سیب‌زمینی برای استان‌های مطالعه‌شده انجام شده است.

با توجه به جدول ۳، شکل زیر دربارهٔ محتوی رد پای آب محصول سیب‌زمینی به تفکیک هر استان نشان داده می‌شود.

جدول ۳. محاسبهٔ رد پای آب محصول سیب‌زمینی در استان‌های تولیدکننده

استان	آب مصرفی (میلی‌متر)			ردپای آب (مترمکعب بر تن)			
	تبخیر و تعرق گیاه (ET_c)	نیاز آبیاری (IR)	بارش مؤثر (P_{eff})	رد پای آبی	رد پای سبز	رد پای خاکستری	رد پای آب کل
اردبیل	۶۰۳	۵۳۶	۶۷	۱۵۵	۱۹۴	۲۸	۳۷۷
فارس	۷۱۶	۶۵۳	۶۳	۲۲۱	۲۶۴	۷۰	۵۵۵
خراسان رضوی	۹۱۷	۸۸۲	۳۵	۲۷۷	۲۹۹	۶۲	۶۳۸
همدان	۵۹۴	۵۵۶	۳۸	۱۴۸	۱۶۸	۳۰	۳۴۶
اصفهان	۶۴۵	۶۴۰	۵	۲۰۷	۲۱۰	۳۶	۴۵۳
کردستان	۶۲۸	۵۷۲	۵۶	۱۸۱	۲۱۷	۳۱	۴۲۹
آذربایجان شرقی	۶۱۱	۵۵۰	۶۱	۱۶۵	۲۰۲	۳۵	۴۰۲
کرمان	۸۵۸	۸۴۲	۱۶	۲۹۶	۳۰۸	۳۵	۶۳۹
سمنان	۶۸۱	۶۸۱	۰	۳۵۲	۳۵۲	۳۹	۷۴۳
خراسان شمالی	۸۰۴	۷۸۱	۲۳	۳۱۷	۳۳۶	۳۲	۶۸۵



شکل ۳. سهم رد پای آب آبی، سبز و خاکستری در تشکیل مقدار رد پای آب کل محصول سیب‌زمینی در هر استان

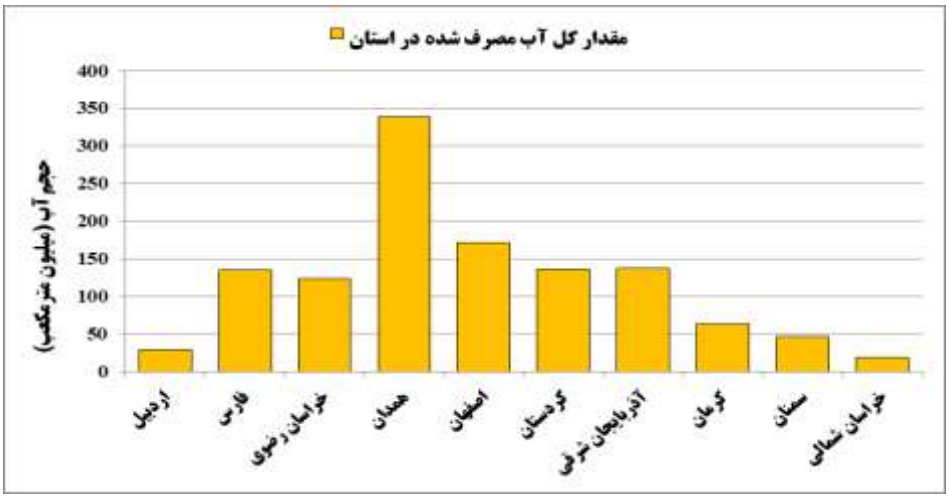
براساس نتایج شکل ۳، در همهٔ استان‌های مطالعه‌شده، رد پای آب سبز محصول بیش از سایر رد پاهای آب است. برای تولید یک محصول کشاورزی، مقدار آب موجود برای رشد گیاه ممکن است در چند حالت مصرف شود. ممکن است این آب از سطح خاک تبخیر شده و از دسترس گیاه خارج شود، بر اثر آب‌شویی از ناحیهٔ توسعهٔ ریشه دور شده و یا توسط ریشه‌های گیاه جذب و به مصرف گیاه برسد، رد پای آب سبز این مقدار را مد نظر قرار می‌دهد [۲۱].

بر این اساس، نتیجهٔ به‌دست‌آمده در این بخش نشان می‌دهد با توجه با تفاوت زیاد میان تبخیر و تعرق گیاه و بارش مؤثر، در همهٔ استان‌ها، محصول سیب‌زمینی، آب مورد نیاز خود را از رطوبت موجود در خاک به‌دست

می‌آورد. بدین‌معنا که آبیاری در این نواحی، بسیار انجام می‌شود ولی عواملی همچون تبخیر زیاد، سبب هدررفت این آب (آب آبی) شده و گیاه برای رشد، از رطوبت خاک که بر اثر بارش تأمین شده استفاده می‌کند. برای مثال، همان طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، بیشترین محتوی رد پای سبز متعلق به استان سمنان است. این شرایط نشان می‌دهد مقدار زیادی از آب در دسترس گیاه در خاک (به‌صورت رد پای آب سبز)، صرف تبخیر و تعرق شده و به همین علت محتوای رد پای سبز آن به‌شدت افزایش یافته است؛ اما در مقابل استان همدان، کمترین مقدار رد پای آب سبز را دارد و می‌توان عواملی همچون مسائل اقلیمی و شرایط خاک حاکم بر منطقهٔ غربی کشور را از علل وقوع این حالت دانست.

دربارهٔ محتوی رد پای آب آبی محصول، استان همدان کمترین و استان سمنان بیشترین رد پای آبی را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۳). همان طور که از رابطهٔ ۷ مشخص است، رد پای آب آبی به نیاز آبی محصول مرتبط است. یعنی مقدار آبی که گیاه برای رشد از طریق آبیاری لازم دارد را مشخص می‌کند. نتیجه نشان می‌دهد در تولید محصول سیب‌زمینی در همهٔ استان‌ها به‌جز استان سمنان، مقدار آب مصرفی گیاه برای رشد از طریق آبیاری، کمتر از مقدار تبخیر و تعرق گیاه و رطوبت جذب‌شده از خاک است. به‌بیان دیگر، بیشترین مصرف آب در گیاه، در فرایند تبخیر و تعرق استفاده می‌شود و گیاه مقدار بیشتر از نیاز خود را از طریق رطوبت باقی‌مانده در خاک تأمین می‌کند که ناشی از باران است. دربارهٔ استان سمنان، با توجه به جدول ۳، بارش مؤثری که بتواند به استفادهٔ گیاه برسد صفر است و همهٔ مقدار آب آبیاری قبل از مصرف گیاه، از دسترس آن خارج می‌شود. به‌بیانی دیگر، می‌توان چنین گفت که همهٔ نیاز آبی محصول در این استان، از طریق بارش تأمین می‌شود.

در قسمت دیگر پژوهش رد پای آب خاکستری دربارهٔ محصول سیب‌زمینی بررسی شد. نتایج این قسمت از مطالعه بیان‌کنندهٔ آن است که بیشترین رد پای آب خاکستری مربوط به استان فارس و کمترین مقدار آن مربوط به استان همدان است. برای محاسبهٔ رد پای آب خاکستری عواملی همچون مقدار مصرف کود و عملکرد محصول بسیار اهمیت دارند. به‌طوری که مقدار مصرف کود رابطهٔ مستقیم و عملکرد رابطهٔ عکس با محتوای آب خاکستری دارد (رابطهٔ ۸). در همهٔ استان‌ها، کمترین سهم از رد پای آب کل، مربوط به رد پای آب خاکستری است؛ پس برای تولید محصول سیب‌زمینی در سطح استان‌های مطالعه‌شده، توجه به مسائل منابع آب، می‌تواند بیش از مخاطرات محیط زیستی تولید این محصول توجه شود. البته شایان یادآوری است که این موضوع در نتیجهٔ مطالعهٔ حاضر قابلیت بحث داشته و در صورتی که سایر مسائل محیط زیستی مانند مصارف آفت‌کش‌ها و سایر سموم مد نظر قرار گیرد، شرایط دچار تغییر خواهد شد. در این قسمت از مطالعه، با توجه به مقدار تولید محصول سیب‌زمینی، مقدار آب مصرفی برای تولید سیب‌زمینی در سال زراعی ۹۳-۱۳۹۴ به تصویر کشیده شده است.



شکل ۴. حجم آب مصرف‌شده برای تولید محصول سیب‌زمینی در هر استان برای سال زراعی ۱۳۹۳ـ ۱۳۹۴

براساس شکل ۴، در سال زراعی ۱۳۹۳ـ ۱۳۹۴ بیش از ۱۱۱۹/۴ میلیون مترمکعب آب در سطح استان‌های مطالعه‌شده، برای تولید محصول سیب‌زمینی در کشت آبی مصرف شده است. در بین این استان‌ها، همدان بیشترین و استان خراسان شمالی کمترین حجم آب مصرفی را داشته‌اند. نکتهٔ شایان تأمل اینکه استان همدان کمترین رد پای آب را به خود اختصاص داده است (شکل ۳)؛ ولی مقدار تولید زیاد آن، موجب مصرف حجم شایان توجهی آب برای تولید این محصول شده است. اما استان خراسان شمالی که رد پای آب زیادی دارد (شکل ۳)، کمترین حجم آب مصرفی را در این حوزه داشته است. حال نیاز است تا با درنظرگرفتن شرایط آبی استان و تخصیص منابع آب، مدیریت لازم را برای تولید محصولات کشاورزی اعمال کرد.

بحث و نتیجه‌گیری

کشاورزی مهم‌ترین بخش مصرف‌کنندهٔ آب در جهان شناخته شده و افزایش جمعیت و نیاز به غذا، سبب استفادهٔ فشرده از منابع طبیعی شده است. فعالیت کشاورزی بر هر دو جنبهٔ آب یعنی کیفیت و کمیت تأثیرگذار است [۲۶]. از این‌رو، شاخصی برای مدیریت پایدار و همه‌جانبهٔ منابع آب با عنوان «رد پای آب» ارائه شده است. در پژوهش حاضر شاخص رد پای آب برای محصول سیب‌زمینی، در سطح استان‌های اصلی تولیدکنندهٔ آن تجزیه و تحلیل شد.

نتایج مطالعه نشان داد از بین شاخص‌های تشکیل‌دهندهٔ مفهوم رد پای آب، به‌ترتیب رد پای آب سبز، آبی و خاکستری بیشترین سهم را در تشکیل شاخص مطالعه‌شده به خود اختصاص دادند. زیادبودن محتوای رد پای آب سبز بدین‌معناست که بیشتر نیاز آبی آن توسط رطوبت باقی‌مانده در خاک (بارش) و نه مقدار آبیاری مستقیم؛ تأمین می‌شود و گیاه سیب‌زمینی مقدار فراوانی از آب دریافتی خود را در مسیر تبخیر و تعرق صرف می‌کند. برای کاهش جزء رد پای آب سبز می‌توان راهکارهایی از جمله مالچ‌پاشی (ترجیحاً مالچ زیستی) را پیشنهاد کرد.

رد پای آب آبی نیز سهم شایان توجهی را به خود اختصاص داده است. برای کاهش سهم این جزء در مقدار رد پای آب کل، می‌توان به راهکارهایی مثل تنظیم دور آبیاری و استفاده از سیستم‌های نوین آبیاری اشاره کرد. رد پای آب خاکستری کمترین مقدار را به خود اختصاص داد که نتیجهٔ بسیار مطلوبی است، به این علت که نشان می‌دهد در مجموع برای تولید این محصول، مقدار کمی آب از طریق کود شیمیایی آلوده می‌شود. برای کاهش این جزء نیز اقداماتی نظیر کاهش مصرف کود و جایگزینی کود شیمیایی با کودهای زیستی را می‌توان پیشنهاد کرد.

در بین استان‌های بررسی‌شده، استان همدان کمترین رد پای آب (۳۴۶ مترمکعب بر تن) و استان سمنان بیشترین مقدار رد پای آب (۷۴۳ مترمکعب بر تن) را به خود اختصاص دادند. میانگین رد پای آب محصول سیب‌زمینی در سطح استان‌های مطالعه‌شده، ۵۲۶/۷ مترمکعب بر تن محاسبه شد. هانگ و همکارانش [۲۷] مقدار رد پای آب محصول سیب‌زمینی چین را ۸۲۳ مترمکعب بر تن محاسبه کردند که در این مطالعه سهم رد پای آبی، سبز و خاکستری به‌ترتیب ۲۹، ۵۹ و ۱۲ درصد به‌دست آمد. در تحقیق دیگری توسط رودریگرز و همکارانش [۲۶] در کشور آرژانتین، رد پای آب محصول سیب‌زمینی ۳۲۴ مترمکعب بر تن محاسبه شد. مقادیر متفاوت در رد پای آب یک محصول کشاورزی می‌تواند به سبب تفاوت در اقلیم، نوع خاک و مدیریت به‌کار گرفته شده در مزرعه باشد.

در قسمت پایانی پژوهش، حجم آب مصرفی برای تولید سیب‌زمینی، در غالب رد پای آب بررسی شد. نتیجه نشان داد به علت مقدار تولید زیاد این محصول در استان همدان، نزدیک به ۳۳۹ میلیون مترمکعب آب در سال زراعی ۱۳۹۳ـ ۱۳۹۴ برای تولید سیب‌زمینی در این استان مصرف شده است که عدد شایان توجهی است و لازم است در مطالعاتی تأثیرات آن بر منابع تأمین آب کشاورزی استان بررسی شود. در قسمت ابتدای پژوهش، گفته شد که کشور برای تولید محصول سیب‌زمینی، به پنج منطقهٔ اصلی تقسیم شد. حال براساس نتایج بررسی شاخص رد پای آب، استان‌های واقع در مناطق غرب و شمال، برای کشت این محصول اولویت دارند و بهتر است در آینده این مناطق به‌عنوان قطب کشت سیب‌زمینی کشور معرفی شوند.

منابع

[1]. Torriani D, Calanca P, Lips M, Amman, H, Beniston M, Fuhrer J. Regional assessment of climate change impacts on maize productivity and associated production risk in Switzerland. Reg. Environ. Change. 2007; 7(3): 209–221.

[2]. Bocchiola D, Nana E, Soncini A. Impact of climate change scenarios on crop yield and water footprint of maize in the Po valley of Italy. Agric. Water Manag. 2013; 116(1): 50–61.

[3]. Supit I, van Diepen CA, Dewit AJW, Kabat P, Baruth B, Ludwig F. Recent changes in the climatic yield potential of various crops in Europe. Agric. Syst. 2010; 103(7): 683–694.

[4]. Fader M, Gerten D, Thammer M, Lotze-Campen H, Lucht W, Cramer W. Internal and external green–blue agricultural water footprints of nations, and related water and land savings through trade. Hydrol. Earth Syst. Sci. 2011; 15(4): 1641–1660.

[5]. Palazzoli I, Maskey S, Uhlenbrook S, Nana E, Bocchiola D. Impact of prospective climate change on water resources and crop yields in the Indrawati basin, Nepal. Agric. Syst. 2015; 133(8): 143–157.

[6]. Herath I, Green S, Horne D, Singh R, Clothier B. Quantifying and reducing the water footprint of rain-fed potato production Part I: Measuring the net use of blue and green water. J. Clean. Prod. 2014; 81(15): 111–119.

[7]. Cucek L, Klemes JJ, Kravanja Z. A review of footprint analysis tools for monitoring impacts on sustainability. J. Clean. Prod. 2012; 34(6): 9–20.

[8]. Hoekstra AY. Virtual Water Trade: Proceedings of the international expert meeting on virtual water trade, Delft, The Netherlands, 12-13 December 2002. UNESCO-IHE, Delft, The Netherlands. Value of Water Research Report Series. 2003; No. 12.

[9]. Mekonnen MM, Hoekstra AY. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. Hydrol. Earth Syst. Sci. 2011; 15(4): 1577–1600.

[10]. Yuhang W, Deshan T, Ding Y, Agoramoorthy, G. Incorporating water consumption into crop water footprint: A case study of China's south–north water diversion project. Sci. Total Environ. 2016. 545(14): 601–608.

[11]. Hoekstra AY. Water scarcity challenges to business. Nat. Clim. Change. 2014; 4(7): 318–320.

[12]. Zhuo L, Mekonnen, MM, Hokestra AY, Wada Y. Inter- and intra-annual variation of water footprint of crops and blue water scarcity in the Yellow River basin (1961–2009). Adv. Water Resour. 2016; 87(11): 29–41.

[13]. Chukalla AD, Krol MS, Hoekstra AY. Green and blue water footprint reduction in irrigated agriculture: effect of irrigation techniques, irrigation strategies and mulching. Hydrol. Earth Syst. Sci. 2015; 19(3): 4877–4891

[14]. Mekonnen MM, Hoekstra AY. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. Hydrol. Earth Syst. Sci. 2011; 15(3): 1577–1600.

[15]. Lu Y, Zhang X, Chen S, Shao L, Sun H. Changes in water use efficiency and water footprint in grain production over the past 35 years: a case study in the North China Plain. J. Clean. Prod. 2016. 116(17): 71–79.

[16]. Ababaei B, Ramezani Etedali, H. Water footprint assessment of main cereals in Iran. Agric. Water Manag. 2017; 179(21): 401-411.

[17]. Schyns JF, Hoekstra AY. The added value of water footprint assessment for national water policy: A Case Study for Morocco. Plos One. 2014; 9(6): 1–14.

[18]. Ministry of Agriculture, Agricultural statistics of crop productions for 2014-2015 crop year. Ministry of Agriculture Publication. Vol.1. 2015; 163p. [In Persian]

[19]. Hoekstra AY, Chapagain AK. Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources. Blackwell Publishing, Oxford, UK; 2008.

[20]. Hoekstra AY, Chapagain AK, Aldaya MM, Mekonnen MM. Water footprint manual: State of the Art 2009. Water Footprint Network, Enschede, The Netherlands; 2009.

[21]. Hoekstra AY, Chapagain AK, Aldaya MM, Mekonnen MM. The water footprint assessment manual: Setting the global standard. Earth scan, London, UK; 2011.

[22]. Ministry of Agriculture, Costs of agricultural productions. Ministry of Agriculture Publication. 2014; 73p. [In Persian]

[23]. Ministry of Agriculture, Agricultural statistics of water and soil resources. Ministry of Agriculture Publication. Vol. 2. 2015; 73p. [In Persian]

[24]. Chapagain AK, Hoekstra AY, Savenije HHG. Water saving through international trade of agricultural products. Hydrol. Earth Syst. Sci. 2006; 10(4): 455–468

[25]. Prasad R, Hochmuth GJ, Boote KJ. Estimation of nitrogen pools in irrigated potato production on sandy soil using the model SUBSTOR. Plos One. 2015; 10(1): 0–20.

[26]. Rodriguez CI, Ruiz de Galarreta VA, Kruse EE. Analysis of water footprint of potato production in the Pampean region of Argentina. J. Clean. Prod. 2015; 90(4): 91–96.

[27]. Huang J, Zhang H, Tong W, Chen F. The impact of local crops consumption on the water resources in Beijing. J. Clean. Prod. 2012; 21(1): 45–50.