

بررسی رد پای آب مجازی در صنعت (مطالعه موردی: صنایع مواد شوینده)

فاطمه زال^۱، حامد مازندرانیزاده^{۲*}، هادی اعتدالی رضانی^۲۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مدیریت منابع آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(ه)، قزوین، ایران۲. دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(ه)، قزوین، ایران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۹/۰۲/۲۲؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۹/۰۶/۱۹)

چکیده

کشور ایران به دلیل واقع شدن در اقلیم خشک و نیمه‌خشک و همچنین، با رشد روزافزون مصارف آب در بخش‌های کشاورزی، شرب و صنعت، با خطر جدی بروز بحران آب مواجه شده است. برای مقابله با این بحران، باید نسبت به انواع مصرف آب با حساسیت بیشتری برخورد شود. بخش صنعت یکی از مصرف‌کنندگان عمده منابع آب کشور است و مدیریت مصرف آب در این بخش، باید مورد توجه قرار گیرد، تا علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف آب، نیاز آبی صنایع در آینده نیز تأمین شود. مطالعه حاضر، روی یکی از کارخانه‌های بزرگ تولید مواد شوینده در استان قزوین صورت گرفته است. نوعی آنالیز مرز سیستم برای یک کارخانه تولید مواد شوینده ارائه شده و محدوده محاسبات عوامل مصرف آب را مشخص کرده است. با استفاده از اطلاعات دریافت‌شده از کارخانه و محاسبات مربوط به آن، در سال ۲۰۱۹ مقدار رد پای آب کلی کارخانه ۲۶/۶۴ مترمکعب بر تن محصول محاسبه شده است. میزان رد پای آب مستقیم و غیرمستقیم به ترتیب ۰/۶۵۸ و ۲۵/۹ مترمکعب بر تن محصول برآورد شده است که نشان‌دهنده سهم زیاد تولید مواد شوینده در مصرف آب است. در پژوهش حاضر، رد پای آب خاکستری در این صنعت ۱۴/۵ مترمکعب بر تن محاسبه شده و میزان رد پای آن روی میزان رد پای آب کلی کارخانه بسیار تأثیرگذار است.

کلیدواژگان: رد پای آب مجازی، رد پای آب خاکستری، کاهش مصرف آب، مصرف انرژی، مواد شوینده.

مقدمه

اصطلاح آب مجازی برای نخستین بار توسط جان آنتونی آلن در سال ۱۹۹۳ میلادی مطرح شد. امروزه نیز مطالعات جدید و متنوعی درباره میزان آب مجازی مورد نیاز انواع کالاها در حال انجام است. به طور مثال، مطالعه‌ای در مؤسسه یونسکو^۱ برای تعیین آب مصرفی برخی کالاهای اساسی انجام شده که بر اساس آن مقدار آب مصرفی برای تولید یک لباس از جنس کتان ۴۱۰۰ لیتر است [۱]. بخش صنعت یکی از مصرف‌کنندگان منابع آب کشور است و مدیریت مصرف آب در این بخش، از مهم‌ترین اولویت‌هایی است که باید مورد توجه قرار گیرد، تا علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف آب، نیاز آبی صنایع در افق آینده نیز تأمین شود. مواد شوینده و پاک‌کننده و بهداشتی جزء گروه مواد مصرفی شیمیایی^۲ قرار می‌گیرند. سهم گروه صنایع و معادن در تولید ناخالص داخلی ایران حدود ۱۵ درصد است و سهم صنعت شوینده از گروه صنایع و معادن تولید ناخالص داخلی حدود ۲/۳ درصد است. بنابراین، سهم صنعت شوینده در تولید ناخالص داخلی حدود ۰/۴ درصد است.

محاسبه رد پای آب در محصولات صنعتی از جمله صنعت مواد شوینده، تقریباً شبیه به محصولات کشاورزی است. روش‌های ساخت و استانداردهای تولید محصولات صنعتی در کشورهای مختلف، متفاوت است. بنابراین، با در نظر گرفتن شیوه‌های متنوع تولید و تفاوت در استانداردها، به همین میزان ممکن است از میزان آب متفاوتی در تولید یک کالای خاص استفاده شود و در نتیجه، میزان رد پای آب آنها نیز از کشوری به کشور دیگر و حتی از محصولی به محصول دیگر متفاوت خواهد بود.

در پژوهش حاضر، مدلی برای محاسبه رد پای آب در صنعت تولید مواد شوینده ارائه شده است که راهکار جامعی را برای محاسبه رد پای آب مستقیم و غیرمستقیم ارائه می‌کند. نوعی آنالیز مرز سیستم برای استفاده مدل ارائه‌شده و کارخانه تولید مواد شوینده به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب و بررسی شده است. ظرفیت اسمی تولید مواد شوینده در ایران حدود ۴ میلیون تن است، اما در حال حاضر فقط ۱/۵ میلیون تن در این حوزه تولید می‌شود

که این میزان تولید به معنای خالی ماندن حدود ۶۰ درصد از ظرفیت تولید صنعت شوینده است. به این معنا که با توجه به نیاز کشور، فقط ۴۰ درصد از محصولات شوینده تولید می‌شود که برای تأمین و تولید ۶۰ درصد دیگر از ظرفیت تولید، به منابع آبی بیشتری نیاز است.

شاخص فعلی اندازه‌گیری آب مصرفی در کارخانه‌های تولید مواد شوینده با واحد مترمکعب آب مصرفی برای تولید هر تن مواد شوینده بیان می‌شود. در شاخص یادشده، اندازه‌گیری آب تا حد زیادی به شیوه تولید و ماشین‌آلات استفاده‌شده در خطوط تولید بستگی دارد. ظرفیت تولید واحد نیز - هرچند به مقدار کم- در حجم آب مصرفی مؤثر است [۲].

به بیانی دقیق‌تر، رد پای آب یک محصول، به‌صورت مجموع مقدار آبی است که به‌صورت مستقیم و یا غیرمستقیم برای تولید یک محصول مصرف شده و بعد از بررسی مصرف آب در تمامی مراحل چرخه تولید، تخمین زده می‌شود [۳].

روند محاسبه برای انواع تولیدات و محصولات یکسان است و این محصول می‌تواند برای بخش کشاورزی، صنعتی و یا خدماتی باشد. اندازه‌گیری و محاسبه رد پای آب مجازی محصولات در صنعت در سال ۲۰۰۶ و از مطالعه روی نخ آغاز شد [۱] و امروزه برای محصولاتی مانند غذاها [۴] و نوشیدنی‌ها [۴]، منسوجات پارچه‌ای و کاغذی [۴]، مواد معدنی [۶] و محصولاتی نظیر رایانه و خودرو انجام می‌گیرد. در یکی از پژوهش‌های یادشده برای نخستین بار به رد پای آب در صنعت فولاد توجه شد و از مفهوم رد پای آب مصرفی به جای شاخص‌های متداول مصرف آب (مصرف آب شرب به ازای هر تن فولاد و یا مصرف آب غیرمستقیم به ازای هر تن فولاد) در صنعت فولاد به سال ۲۰۱۵ استفاده شد [۷] حسینیان و نظام اسلامی در پژوهشی دیگر با مطالعه روی صنعت سیمان، به محاسبه رد پای آب در تولید سیمان پرداختند که در آن مدلی از مرز سیستم یک کارخانه سیمان ارائه شده است که می‌توان از آن برای محاسبه رد پای آب غیرمستقیم محصولات صنعتی دیگر نیز بهره جست. مدل ارائه‌شده اخیر شناخت خوبی از مسیر محاسبه رد پای آب برای سایر صنایع فراهم کرده است، اما عدم اطلاعات کافی برای محاسبه رد پای آب، کاربرد این مدل را برای سایر صنایع

1. UNESCO-IHE Institute for Water Education

2. Consumer Chemicals

متفاوت باشد. همچنین، مصرف مواد شوینده و محاسبه رد پای آب مواد شوینده به‌طور چشمگیری به مصرف نهایی آنها (برای مثال، مصرف مایع ظرف‌شویی برای شستن ظروف و انواع پودرهای شوینده) وابسته است. بنابراین، رد پای آب فرایندهای تولید به‌عنوان بدنه اصلی پژوهش در نظر گرفته شده است [۸].

آنالیز مرز سیستم

به‌منظور استفاده و کاربردی کردن مدل رد پای آب در عمل، از آنالیز مرز سیستم استفاده می‌شود که محدوده و مرزهای مدل را ارائه می‌دهد [۱۰ و ۱۱]. برای این منظور، ابتدا روند کاربرد آب در قسمت‌های مختلف کارخانه بررسی شده و سپس، آنالیز مرز سیستم انجام شده است. در آنالیز مرز سیستم، مصرف کلی آب به دو صورت مستقیم^۱ و غیرمستقیم^۲ در نظر گرفته می‌شود و عوامل مصرف آن معرفی می‌شوند. برای رد پای آب، به‌طور مستقیم آب مصرف‌شده در خط تولید که به‌صورت خام در فرمولاسیون ساخت محصولات شوینده قرار می‌گیرند، در نظر گرفته می‌شود. در بخش رد پای آب غیرمستقیم، آب استفاده‌شده برای کارکنان و همچنین، آب مورد نیاز در بخش‌های خدماتی و فضای سبز کارخانه و نیز حمل‌ونقل و آب انرژی (آبی که برای تأمین و تولید انواع انرژی‌های مصرفی از جمله الکتریسیته و گاز طبیعی استفاده می‌شود را به‌اصطلاح آب انرژی گویند). استفاده‌شده در نظر گرفته می‌شود. مصرف انرژی در این کارخانه به دو صورت الکتریسیته و گاز طبیعی است که در آنالیز مرز سیستم، هریک تأثیر مستقیم در محاسبه رد پای کل کارخانه دارند. در شکل ۱ نمایش مدل جامع محاسبه رد پای آب (مرز سیستم) برای صنایع و کارخانه‌ها مشاهده می‌شود. عوامل در نظر گرفته‌شده برای محاسبه رد پای آب تقریباً برای همه کارخانه‌ها یکسان است.

با توجه به مرز سیستم نشان‌داده‌شده در شکل ۱، رد پای آب فرایند تولید مواد شوینده در کارخانه تولید مواد شوینده مورد توجه پژوهش حاضر بوده و بر این اساس، مدل رد پای آب در کارخانه تولید مواد شوینده در شکل ۲ نشان داده شده است.

با مشکل روبه‌رو می‌سازد. هنوز پژوهش جامعی که رد پای آب را کاملاً در مراحل تولید یک محصول و چرخه تأمین آن محاسبه کند، انجام نشده است [۸].

در هدف پژوهش حاضر، مدلی برای محاسبه رد پای آب در صنعت تولید مواد شوینده ارائه شده است که راهکار جامعی را برای محاسبه رد پای آب مستقیم و غیرمستقیم ارائه می‌کند.

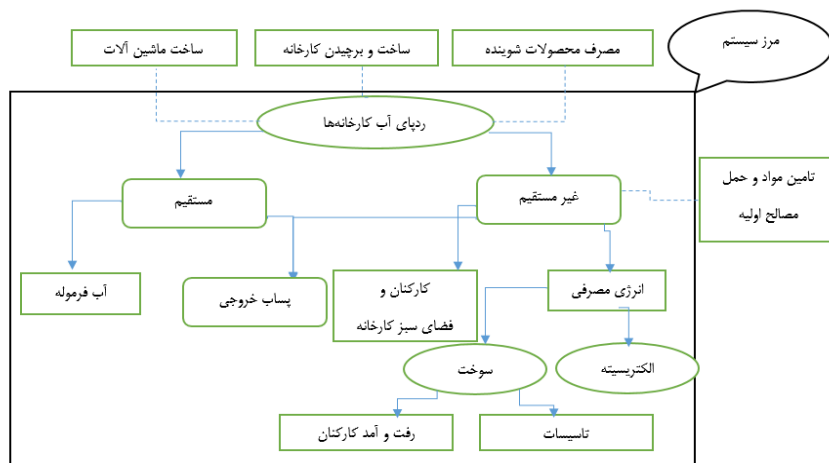
مواد و روش‌ها

روش‌های محاسبه رد پای آب در صنعت

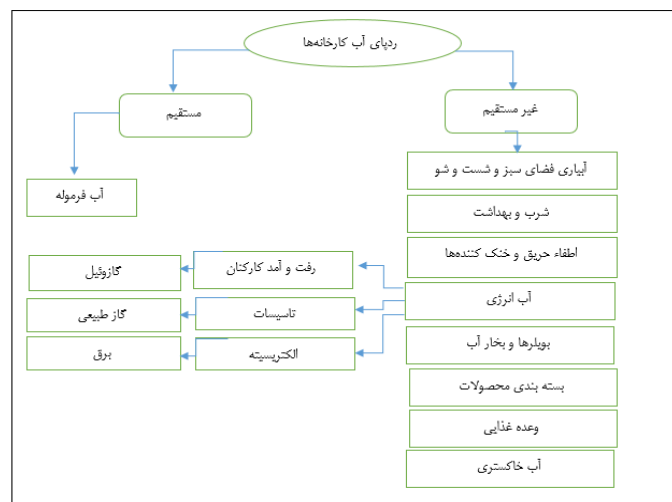
از دو روش برای محاسبه رد پای آب تولید محصول می‌توان استفاده کرد که عبارت‌اند از: روش مجموع زنجیره‌ها و روش مراحل جمع‌شونده‌ها [۹]. روش مجموع زنجیره‌ها، اصولاً برای سیستم‌های تولیدی که فقط یک محصول خروجی دارند، استفاده می‌شود. در روش مجموع زنجیره‌ها، رد پای آب محصول نهایی یک سیستم تولیدی از مجموع رد پای آب فرایندهای مختلف تولید، تقسیم بر مقدار کمی تولید آن محصول به دست می‌آید. روش مراحل جمع‌شونده، نوعی روش عمومی برای محاسبه رد پای آب است که بر پایه مراحل نهایی تولید یک محصول و همچنین، محاسبه رد پای آب چرخه تأمین محصولات اولیه انجام می‌شود [۳]. در روش مراحل جمع‌شونده فرض بر این است که چند ماده ورودی با یکدیگر، سازنده یک محصول خروجی هستند. در این مورد می‌توان رد پای آب محصول خروجی را با مجموع‌گیری ساده از رد پاهای آبی محصولات ورودی و اضافه کردن آن به رد پای آب مراحل تولید به دست آورد [۳]. در محاسبه رد پای آب، نیازمند اطلاعات مفصل و با جزئیات زیادی هستند که این اطلاعات به‌خصوص در صنایع بزرگ معمولاً محرمانه هستند و این امر محاسبه رد پای آب صنعتی و مدیریت آب را دشوار می‌سازد. پژوهش حاضر به علت عمومیت روش مراحل جمع‌شونده، بر پایه روش یادشده قرار می‌گیرد [۷].

محاسبه رد پای آب برخی از مواد اولیه خام در چرخه تأمین تولید مواد شوینده، کار دشواری است و اطلاعات رد پای آب آنها در حال حاضر موجود نیست. علاوه بر این، استخراج و انتقال مواد اولیه شیمیایی خام (رد پای آب و حمل‌ونقل مواد اولیه) می‌تواند با توجه به تعداد منابع و فواصل آنها، که اطلاعات آنها به‌خوبی مستند نیست، بسیار

1. Direct Water
2. Indirect Water



شکل ۱. مرز سیستم برای محاسبه رد پای آب در کارخانه‌ها و صنایع [۱۰ و ۱۱]



شکل ۲. محاسبه رد پای آب (مرز سیستم) در کارخانه تولید مواد شوینده [۱۳ و ۱۴]

با توجه به فناوری تجهیزات به‌کاررفته در آن کارخانه می‌تواند تغییر کند [۷].

در پژوهش حاضر به محاسبه رد پای آب در صنعت تولید مواد شوینده با استفاده از اندازه‌گیری آب در قسمت‌های مختلف یکی از کارخانه‌های بزرگ تولیدکننده مواد شوینده در شهر قزوین پرداخته شده است و رد پای آب مجازی مستقیم، آب غیرمستقیم و آب خاکستری در کارخانه یادشده استخراج شده است. این کارخانه با ظرفیت تولید سالانه حدود ۵۷۳۰۰ تن مواد شوینده مایع (ظرف‌شویی و دست‌شویی)، ۴۴۳۰۰ تن مواد شوینده پودری (پودرهای لباس‌شویی و ظرف‌شویی) و ۱۱۲۰۰ تن جرم‌گیر و پاک‌کننده اسیدی یکی از مجموعه‌های بزرگ

رابطه ریاضی محاسبه رد پای آب مصرفی در کارخانه‌ها و صنایع، از جمله صنایع تولید مواد شوینده به‌صورت رابطه ۱ است:

$$WCF = DWF + IWF \quad (1)$$

که در آن، WCF رد پای آب مصرفی^۱، DWF رد پای آب مستقیم^۲ و IWF رد پای آب غیرمستقیم^۳ کل کارخانه تولید مواد شوینده یا آب مجازی است. مقدار رد پای آب مستقیم برای هر کارخانه و صنعت بسیار متفاوت است و

1. Water Consumption Footprint
2. Direct Water Footprint
3. Indirect Water Footprint

حجم آب مورد نیاز بسته به شرایط محلی و روش‌های تولید تغییر می‌کند. رد پای آب مستقیم در کارخانه بررسی شده برای تمامی تولیدات به صورت ماهانه ثبت و قرائت شده است. رد پای آب مستقیم در واحد تولید (تن)، مطابق رابطه ۲ از نسبت مقدار نهایی آب مصرفی در یک بازه زمانی مشخص بر مقدار محصول تولیدی در همان بازه زمانی به دست می‌آید.

$$(2) \quad \text{مقدار کل آب مستقیم} \\ \text{مقدار تولید کل محصول} = \text{رد پای آب مستقیم به ازای تولید یک تن محصول} \left(\frac{m^3}{ton} \right)$$

میزان رد پای آب مستقیم برای تولید هریک از محصولات تولیدی مواد شوینده در سال ۲۰۱۹ با ظرفیت تولید سالانه ۱۱۰۲۳۷ تن مواد شوینده، برای مواد شوینده مایع، انواع پودرها و مواد شوینده اسیدی و جرم‌گیرها به ترتیب ۰/۹۹۰، ۰/۳۶۸، ۰/۴۴ مترمکعب بر تن است. همان‌طور که میزان رد پای آب مستقیم هر محصول برای یک تن تولید نشان می‌دهد، از آنجا که مواد شوینده مایع بیشترین درصد آب را در ترکیبات خود دارند، رد پای آب مستقیم آنها نسبت به پودر و مواد شوینده اسیدی نیز بیشتر است. همچنین، مواد شوینده اسیدی به دلیل آب بسیار کم در ترکیبات خودشان، میزان رد پای آب مستقیم کمتری در خود دارند. با توجه به نتایج مصرف آب در کارخانه، مجموع آب مصرفی مستقیم در کل تولیدات مواد شوینده ۷۲۶۳۹ مترمکعب در سال و رد پای آب مستقیم کل کارخانه با در نظر گرفتن کل تولیدات مواد شوینده ۱۱۰۲۳۷ تن، معادل ۰/۶۵۸ مترمکعب در تن برای یک سال از تولید کارخانه است.

رد پای آب مصرفی غیرمستقیم تولیدات مواد شوینده کارخانه (IWF)

آب غیرمستقیم انواع موارد مصرفی در کارخانه نیز به مکان و تعداد کارکنان و عوامل مختلف دیگری بستگی دارد. در این بخش راهکار محاسبه رد پای آب غیرمستقیم هریک از عوامل مصرفی تشریح شده است.

اطلاعات به‌کارگرفته‌شده با قرائت کنتورهای اندازه‌گیری در بخش‌های مختلف کارخانه جمع‌آوری شده است.

در تولید مواد شوینده است. در این بررسی برای محاسبه رد پای غیرمستقیم آب از قرائت کنتورهای دقیق اندازه‌گیری برای مصارف و تأثیرات انسانی از جمله حمام و سرویس بهداشتی، شرب، حمل‌ونقل، آبیاری فضای سبز، انواع خنک‌کننده‌ها مانند کولرها، بویلرها و آتش‌نشانی و همچنین، برای بررسی ارتباط بین رد پای آب مجازی و نیروی انسانی شاغل در کارخانه تولید مواد شوینده بهداشتی از مفهوم رد پای آب وعده‌های غذایی مصرفی کارکنان در ساعات کاری استفاده شده است. همچنین، به علت نبود معیار جامع برای محاسبه رد پای آب هر وعده غذایی، از مبانی محاسبه رد پای اکولوژیک وعده‌های غذایی به عمل آمده است [۸].

در مطالعه حاضر برای نخستین بار به بررسی و محاسبه رد پای آب خاکستری و پساب خروجی از این صنعت پرداخته شده است و راهکارهایی به منظور کاهش مقدار رد پای آب خاکستری نیز ارائه شده است. رد پای آب مستقیم برای هر محصول همان آب خامی است که در فرمولاسیون و ترکیب اصلی آن محصول استفاده می‌شود. برای محاسبه رد پای آب مجازی مستقیم از قرائت کنتورهای اندازه‌گیری آب مصرفی در فرمولاسیون اصلی هر محصول به‌طور مجزا استفاده شده است. همچنین، برای جمع‌آوری اطلاعات، از مشاهدات میدانی و مصاحبه با کارشناسان مربوط به آن استفاده شده است. در محاسبه رد پای آب مجازی غیرمستقیم، از روش مربوط به رد پای آب الکتریسیته و سوخت مصرفی (گاز طبیعی) در پژوهش مک اونن و همکاران [۱۳] پیروی شده است. برای بررسی و محاسبه رد پای آب وعده غذایی از رابطه‌ای که در تحقیق حسینیان و نظام اسلامی [۸] ارائه شده استفاده شده است. در ضمن، برای محاسبه رد پای آب خاکستری نیز از پژوهش رضانی اعتدالی و همکاران [۱۴] استفاده شده است.

نتایج و بحث

رد پای آب مصرفی مستقیم یا آب فرموله (DWF)

مصرف مستقیم آب در هر کارخانه بستگی به نوع فرایند، تجهیزات و ظرفیت آن کارخانه دارد. مصرف مستقیم آب در یک کارخانه تولید انواع مواد شوینده، بیشتر شامل مقدار آب خامی است که در فرمولاسیون محصولات است.

به‌تنبه‌ای و یا از ترکیبات آن که به‌صورت کف هستند، برای کنترل آتش و یا خاموش کردن آن استفاده می‌شود. البته از آب برای حفاظت آتش‌نشان‌ها و دیگر پرسنل نیز هنگام آتش‌سوزی استفاده می‌شود. به این ترتیب، آب باید همیشه به مقدار کافی با فشار مناسب در دسترس باشد و آب مخصوص فرو نشاندن آتش به‌هیچ‌عنوان نباید برای مصارف دیگر به کار رود. به این منظور، همواره مقدار ثابتی آب برای این مورد ذخیره می‌شود. طبق اندازه‌گیری دقیق واحد تولیدی مورد نظر، ۷۵۸۷ مترمکعب رد پای آب برای سیستم‌های خنک‌کننده و کولرهای آبی در سال (۲۰۱۹) برآورد شده است.

با توجه به مساحت سالن‌های تولید و انبارها در این واحد، آب مورد نیاز برای چهار ساعت فرو نشاندن آتش حدود ۵۰۰ مترمکعب در سال برآورد شده است که می‌توان آن را در مخازن بتنی ذخیره کرد. در کل، رد پای آب برای سیستم اطفای حریق و سیستم‌های خنک‌کننده کارخانه ۸۰۸۷ مترمکعب در سال است.

رد پای آب مورد نیاز برای تولید گاز طبیعی مصرفی در کارخانه و تأسیسات کارخانه

ایران با داشتن ۱۶ درصد از ذخایر گازی دنیا، به عنوان یکی از سه کشور دارنده بیشترین ذخایر گاز در جهان مطرح است و رتبه دوم را در جهان در اختیار دارد. بر همین اساس، سوخت فسیلی بیشتر صنایع ایران از نوع گاز طبیعی است. رد پای آب مصرفی در تولید گاز طبیعی در مراحل حفر چاه‌های دسترسی (در ترکیب بنتونیت) و فرآوری گاز در پالایشگاه‌ها (مورد نیاز برای خنک‌کاری برج‌های تقطیر و کمپرسورها) محاسبه می‌شود [۱۵]. برای محاسبه رد پای آب بخش کنونی از اطلاعات، از جدول ۲ استفاده می‌شود و اطلاعات مربوط به تولید گرما و رد پای آب گاز طبیعی در ایران در بخش (کشورهای آسیا) قرار می‌گیرد [۴].

بنابراین، با در نظر گرفتن اطلاعات به‌دست‌آمده از جدول‌های ۲ و ۳ و همچنین، بررسی میزان مصرف گاز که به‌صورت دقیق در کنتورهای گاز کارخانه ثبت می‌شود، می‌توان میزان رد پای آب گاز طبیعی استفاده‌شده در این کارخانه و همچنین، سایر کارخانه‌های تولیدات صنعتی را به دست آورد [۴].

با توجه به تولید هم‌زمان محصولات کارخانه، آب غیرمستقیم برای تولید همه محصولات تولیدی بر اساس نسبت وزنی تولید به کل تولید محاسبه می‌شود. انواع آب غیرمستقیم در تولید محصولات شوینده به شرح موارد زیر است:

رد پای آب مورد نیاز برای شست‌وشو و آبیاری فضای سبز
طبق مطالعات امکان‌سنجی مقدماتی طرح تولید مایعات شوینده در شهرک‌های صنعتی (شرکت گسترش صنایع پایین‌دستی پتروشیمی) برای آبیاری فضای سبز کارخانه به ازای هر مترمربع فضای سبز، ۱/۵ لیتر در روز معادل ۰/۰۱۵ مترمکعب در روز آب در نظر گرفته می‌شود. مساحت فضای سبز کارخانه یادشده حدود ۱۶۷۱ مترمربع است و رد پای آب مصرفی برای آبیاری فضای سبز ۹۰۵ مترمکعب در سال است. برای شست‌وشوی کارخانه نیز سالیانه ۱۵۰۰ مترمکعب آب تخمین زده شده است.

جدول ۱. رد پای آب مصرفی برای آبیاری فضای سبز و شست‌وشوی کارخانه (m^3)

نوع مصرف آب	مترمکعب
رد پای آب برای آبیاری فضای سبز	۹۰۵
رد پای آب برای شست‌وشوی کارخانه	۱۵۰۰
مجموع سالانه	۲۴۰۵

رد پای آب مورد نیاز برای آشامیدن، حمام و آشپزخانه
طبق مطالعات امکان‌سنجی مقدماتی طرح تولید مایعات شوینده در شهرک‌های صنعتی (شرکت گسترش صنایع پایین‌دستی پتروشیمی) موارد یادشده به ازای هر نفر، ۱۵۰ لیتر در روز در نظر گرفته می‌شود. به این ترتیب، به دلیل تعداد پرسنل در سه شیفت برای کارخانه، که ۴۵۰ نفر پیش‌بینی شده است، مقدار آب مورد نیاز این واحد برای مصارف یادشده حدود ۱۹۴۴۰ مترمکعب در سال خواهد بود.

رد پای آب سیستم اطفای حریق و سیستم خنک‌کننده
طبق مطالعات امکان‌سنجی مقدماتی طرح تولید مایعات شوینده در شهرک‌های صنعتی (شرکت گسترش صنایع پایین‌دستی پتروشیمی) آب یکی از مواد معمولی برای کنترل و خاموش کردن آتش به شمار می‌رود و از آن

جدول ۲. تولید سالانه الکتریسیته و گرما از منابع مختلف انرژی برای مناطق مختلف دنیا طی دوره زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۲ (واحد PJ در سال)

منطقه	زغال سنگ	گاز طبیعی	برق آبی	هسته‌ای	نفت	باد	هیزم	زمین گرمایی	خورشید	مجموع
اروپا	۶۶۵۰	۱۰۱۸۰	۲۵۷۹	۴۲۹۴	۸۶۶	۵۶۷	۴۹۳	۱۲۵	۱۱۲	۲۵۸۶۶
چین	۱۴۶۱۲	۲۸۶	۲۵۰۸	۲۸۵	۱۳۵	۱۸۱	۱۰۱	۱۵۶	۰	۱۸۲۵۹
آمریکا و کانادا	۷۲۸۰	۴۲۸۰	۲۳۳۸	۳۳۰۶	۲۰۸	۳۸۰	۱۹۵	۷۴	۷/۵	۱۸۰۶۷
کشورهای آسیا	۴۰۹۴	۵۹۶۵	۱۲۳۶	۱۳۹۲	۲۰۷۷	۳۳	۱۰۴	۱۴۷	۲/۲	۱۴۰۵۱
آمریکای لاتین	۲۵۲	۱۱۲۹	۲۶۵۲	۱۱۱	۶۰۵	۱۸	۳۹	۳۶	۰/۱۶	۴۸۴۲
هند	۲۴۰۶	۳۸۱	۴۱۴	۹۲	۵۱	۷۴	۸۴	۰	۰	۳۵۰۱
آفریقا	۹۲۱	۷۶۶	۳۸۶	۴۸	۲۷۴	۷/۷	۵/۳	۵/۱	۰/۰۹	۳۴۱۲
اقیانوسیه	۶۶۰	۱۹۳	۱۴۰	۰	۲۴	۲۳	۷/۱	۳۰	۰/۰۲	۱۰۷۷
مجموع جهانی	۳۶۸۷۴	۲۳۱۸۰	۱۲۲۵۱	۹۵۲۸	۴۲۳۹	۱۲۸۴	۱۰۲۸	۵۷۰	۱۲۲	۸۹۰۷۶

جدول ۳. رد پای آب مصرفی سالانه در تولید سالانه الکتریسیته و گرما به تفکیک نوع انرژی و منطقه طی دوره زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۲ (10^6 مترمکعب)

منطقه	زغال سنگ	گاز طبیعی	برق آبی	هسته‌ای	نفت	باد	هیزم	زمین گرمایی	خورشید	مجموع
چین	۶۵۹۷	۶۵	۲۳۹۳	۱۹۳	۳۵	۰/۲۳	۴۵۱۹۷	۵۱	۰	۵۴۵۳۱
آمریکای لاتین	۱۳۶	۳۱۰	۴۵۱۳۰	۷۵	۳۳۰	۰/۰۲	۸۲۵۳	۱۲	۰/۰۲	۵۴۲۴۵
اروپا	۳۱۹۱	۲۰۵۸	۴۲۳۹۷	۲۹۰۸	۳۱۰	۰/۷۲	۳۲۸۳۶	۴۲	۱۵	۸۳۷۵۸
هند	۱۳۷۲	۱۰۴	۲۳۰۷	۶۲	۳۰	۰/۰۹	۲۸۱۱۴	۰	۰	۳۲۸۸۹
آمریکا و کانادا	۳۹۱۳	۱۱۷۱	۱۴۹۳۶	۲۲۳۹	۱۱۲	۰/۴۸	۲۳۰۹۲	۲۵	۱/۳	۴۵۴۸۹
کشورهای آسیا	۲۱۸۹	۱۶۲۳	۲۲۶۰۹	۹۴۳	۱۱۳۰	۰/۰۴	۲۱۲۳۳	۵۰	۰/۲۳	۴۹۷۷۶
آفریقا	۵۰۱	۲۱۱	۵۳۰۶۲	۳۲	۱۴۸	۰/۰۱	۱۰۹۱	۱/۷	۰/۰۱	۵۵۰۴۷
اقیانوسیه	۳۷۵	۵۳	۱۰۱۲	۰	۱۳	۰/۰۳	۵۸۴	۱۰	۰	۲۰۴۷
مجموع جهانی	۱۸۲۷۲	۵۵۹۵	۱۸۴۷۴۶	۶۴۵۳	۲۱۰۷	۲	۱۶۰۳۹۸	۱۹۲	۱۶	۳۷۷۷۸۲

رد پای آب الکتریسیته

مک اونن و همکاران طی پژوهشی به بررسی رد پای آب مورد نیاز برای تولید الکتریسیته در نقاط مختلف جهان پرداختند. بر اساس نتایج پژوهش آن‌ها، مقدار رد پای آب مورد نیاز برای تولید الکتریسیته در کشورهای مختلف، اساساً وابسته به نوع فرایند تولید الکتریسیته (برق آبی، حرارتی و غیره) و سوخت‌های مصرفی در تولید آن است. بر اساس پژوهش اخیر، تولید الکتریسیته در ایران در محدوده کم مصرف آب قرار دارد و رد پای تولید هر ترا ژول الکتریسیته در محدوده صفر تا ۵۰۰ مترمکعب (صفر تا ۱/۸ مترمکعب بر مگاوات ساعت) است [۳۶]. رد پای آب الکتریسیته مصرفی برای کارخانه و صنایع را نیز مانند رد پای آب گاز طبیعی، با قرائت کنتورهای برق موجود در کارخانه و اطلاعات موجود در تحقیقات پیشین می‌توان محاسبه کرد (جدول ۵).

بر اساس اطلاعات جدول‌های ۲ و ۳ تحقیق مک اونن و همکاران، مقدار تولید سالانه گرما توسط گاز طبیعی برای (کشورهای آسیا) برابر ۵۹۶۵ پتاژول (PJ) معادل ۵۹۶۵۰۰۰ ترا ژول (TJ) است. با استفاده از مقدار ^{1}HHV (گرمای سوختن یا ارزش حرارتی یا ارزش گرمایی یک سوخت، مقدار گرمایی است که از سوختن کامل یک واحد جرم از آن سوخت در دما و فشاری خاص آزاد می‌شود و واحد آن واحد انرژی بر واحد جرم است) که برای گاز طبیعی برابر $۰/۰۰۰۰۳۴$ ترا ژول بر مترمکعب ($TJ/M3$) است. مقدار تولید گاز طبیعی بعد از تقسیم ۵۹۶۵۰۰۰ بر $۰/۰۰۰۰۳۴$ برابر ۱۷۵/۴۴۱ گیگا مترمکعب (Gm^3) در سال است. بنابراین، شدت آب مصرفی برای تولید گاز طبیعی برابر ۹/۲۵۱ لیتر آب بر هر مترمکعب گاز طبیعی محاسبه می‌شود (جدول ۴) [۱۳].

1. Higher Heating Value

جدول ۴. مصرف سالانه انرژی (گاز طبیعی) و رد پای آب انرژی کارخانه تولید مواد شوینده

نوع انرژی	مصرف انرژی کارخانه	رد پای آب انرژی	
		محدوده تولید	میانگین (m^3)
Natural gas	$5089579 m^3$	$9/251 (m^3/m^3)$	۴۷۰۷۹

جدول ۵. مصرف سالانه انرژی (الکتریسیته) و رد پای آب انرژی کارخانه تولید مواد شوینده

نوع انرژی	مصرف انرژی کارخانه	رد پای آب انرژی	
		محدوده تولید	میانگین (m^3)
الکتریسیته	۷۷۸۸ Mwh	$1/8 (m^3/Mwh)$	۱۴۰۱۹

رد پای آب سوخت‌های مورد نیاز حمل‌ونقل

کینگ و همکاران طی تحقیقی به بررسی شدت آب مورد نیاز برای تولید و مصرف سوخت ناوگان حمل‌ونقل آمریکا پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد رد پای آب مصرف سوخت خودروهای بر پایه سوخت بنزین به‌طور میانگین برابر $0/16$ تا $0/33$ و خودروهای بر پایه سوخت دیزل حدود $0/18$ تا $0/26$ لیتر به ازای هر کیلومتر مسافت طی شده است [۳۱]. برای محاسبه رد پای آب سوخت مصرفی در بخش رفت‌وآمد کارکنان به کارخانه، درخور یادآوری است تعداد کارکنان کارخانه یادشده، ۴۵۰ نفر هستند. بنا بر مطالعات و بازدیدهای میدانی، بیشتر کارکنان از ساکنان نزدیک‌ترین شهر به کارخانه هستند و برای رفت‌وآمد آنها، سرویس‌هایی با ظرفیت ۲۰ نفر در نظر گرفته شده است که سوخت مصرفی سرویس‌ها، گازوییل است. ۸۰ درصد کارکنان از سرویس‌ها، و باقی از خودروهای شخصی استفاده می‌کنند. روزانه ۱۸ سرویس، وظیفه رفت‌وآمد کارکنان به کارخانه را به عهده دارد. بر اساس اطلاعات ارائه‌شده از کارخانه یادشده، مجموع مسافت طی‌شده توسط تمامی سرویس‌ها، سالانه برابر ۱۶۰ هزار کیلومتر محاسبه شده است. بر اساس اطلاعات جدول ۶ با در نظر گرفتن مقدار $0/22$ لیتر آب (میانگین $0/18$ تا $0/26$) به‌عنوان رد پای آب مصرف سوخت خودروهای دیزلی در هر کیلومتر مسافت طی‌شده، رد پای آب حمل‌ونقل کارکنان با سرویس‌های کارخانه در یک سال، تقریباً ۳۵ مترمکعب برآورد شده است.

جدول ۶. شدت مصرف آب در بخش حمل‌ونقل کارخانه تولید مواد شوینده

بنزین حمل‌ونقل (لیتر بر کیلومتر)	$0/16 - 0/33$
گازوییل حمل‌ونقل (لیتر بر کیلومتر)	$0/18 - 0/26$

رد پای آب وعده‌های غذایی کارکنان

پژوهش‌های پیشین در زمینه رد پای آب مواد غذایی، بیشتر به محاسبه رد پای آب مواد و محصولات کشاورزی مختلف پرداخته‌اند [۴۲]. و رد پای آب یک وعده غذایی که متشکل از چند محصول و ماده غذایی است، کاملاً محاسبه نشده است. برای محاسبه رد پای آب فرآوری و تهیه هر وعده غذایی ارائه و شیوه ارتباط دادن رد پای آب وعده‌های غذایی با ساعت‌های حضور کارکنان در کارخانه‌ها به‌صورت روابط ریاضی بیان شده است [۸].

برای محاسبه رد پای آب تغذیه کارکنان کارخانه‌ها طی یک دوره زمانی مشخص، رابطه ۳ پیشنهاد شده است:

$$WF_{food} = \frac{WF_{meal}}{h_m} \times N_h \quad (3)$$

که در آن، WF_{food} رد پای آب کلی تغذیه کارکنان (برحسب لیتر یا مترمکعب) در واحد زمان، WF_{meal} رد پای آب هر وعده غذایی کارگاهی برحسب لیتر بر هر وعده غذای کارگاهی، h_m ساعت کاری مفید هر یک از کارکنان (برای مثال، در یک نوبت کاری) که در آن یک وعده غذایی در کارگاه یا کارخانه مصرف می‌شود و N_h تعداد کل ساعت کاری کارگاه (در واحد زمان، برای مثال یک سال) یا کارخانه بررسی شده است. برای محاسبه WF_{meal} از رابطه ۴ استفاده می‌شود:

$$WF_{meal} = C_m \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{100} \times \frac{1}{C_i} \times WF_i \quad (4)$$

که در آن، C_m بیانگر قیمت تمام‌شده هر وعده غذایی است، با توجه به حداقل قیمت بازار غذایی، ۱۰ هزار تومان برای هر وعده در نظر گرفته می‌شود. F_i درصد هزینه هر یک از اجزای تشکیل‌دهنده یک وعده غذایی از قیمت

از اجزای تشکیل دهنده وعده غذایی برحسب لیتر بر کیلوگرم است. در جدول ۷، اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه رد پای آب هر وعده غذایی ارائه شده است.

نهایی یک وعده غذایی است. C_i قیمت روز هر واحد وزنی از اجزای تشکیل دهنده وعده غذایی است، که بر اساس اطلاعات روزانه قابل تغییر است و WF_i رد پای آب هریک

جدول ۷. اطلاعات مربوط به اجزای تشکیل دهنده هر وعده غذایی [۱۶ و ۱۷]

اجزاء	$\%F_i$	$C_i(\frac{Toman}{Kg})$	$WF_i(\frac{L}{Kg})$
گوشت گاو	۲۵	۳۰۰۰	۱۵۵۰۰
گوشت مرغ	۲۵	۶۰۰۰	۳۹۰۰
حبوبات	۱۲	۶۰۰۰	۲۱۲۵
نوشیدنی(نوشابه)	۱۰	۲۰۰۰	۵۰۰
سبزیها	۸	۲۰۰۰	۳۸۰
نان گندم	۶	۱۷۵۰	۱۳۰۰
روغن ذرت	۵	۵۰۰۰	۲۵۷۵
لبنیات (پنیر)	۵	۱۰۰۰۰	۵۰۰۰
چای	۴	۲۰۰ (تومان به ازای هر فنجان)	۳۰ (لیتر به ازای هر فنجان)

جدول ۸. رد پای آب در قسمت بویلرها و آب تبخیرشده در کارخانه تولید مواد شوینده (m^3)

مقدار بخار آب	آب واردشده در بویلرها
۱۲۰	۱۷۲۲۴
۱۷۳۴۴	مجموع

رد پای آب خاکستری

در کارخانه تولید مواد شوینده، دو نوع پساب موجود است که یکی از آنها مربوط به پساب ناشی از تولید محصول از جمله پساب خروجی از ماشین آلات و پساب ناشی از تهیه ماده تولیدی در کارخانه و دیگری مربوط به پساب ناشی از فاضلابهای انسانی است که ماهانه به حوضچه تصفیه ریخته شده و اندازه گیری می شود. در مجموع، مقدار حجم پساب خروجی ناشی از تولیدات کارخانه، ۳۳۱۳۱ مترمکعب اندازه گیری شده است. با در اختیار داشتن میزان حجم پساب خروجی کارخانه و همچنین، ضوابط فاضلابها و استانداردهای محیط زیست، می توان رد پای آب خاکستری را از طریق رابطه ۵ محاسبه کرد [۱۰].

$$wf_{gray} = \frac{NAR}{C_{MAX} - C_{nat}} \times \frac{1}{Yield} \quad (5)$$

در این رابطه NAR مقدار غلظت کل مواد محلول (گرم بر مترمکعب)، C_{MAX} حداکثر غلظت مجاز آلاینده (گرم بر مترمکعب)، C_{nat} غلظت طبیعی املاح در آب طبیعی استفاده شده برای کارخانه (از آنجا که هیچ گونه

بر اساس رابطه ۴ و جدول ۷، رد پای آب هر وعده غذایی معمول (WF_{meal}) برای کارخانه محاسبه می شود. در ضمن، با توجه به تعداد کارکنان شاغل در کارخانه و همچنین، روزها و ساعت کاری کارکنان به راحتی می توان رد پای آب وعده غذایی کارکنان را برای بازه های زمانی مختلف برآورد کرد. رد پای آب هر وعده غذایی معمول کارکنان با استفاده از نتایج تحقیق (WF_{meal}) برابر $4756/88$ لیتر محاسبه شده است.

در مجموع، رد پای آب مجازی وعده غذایی مصرفی توسط کارکنان با فرض ۸ ساعت کار برای هر روز کاری و مصرف یک وعده غذایی محاسبه شده است که طبق اطلاعات دریافتی از کارخانه، مجموع ساعت های کار کل کارکنان در یک سال برابر 1036800 ساعت است و رد پای آب وعده غذایی برای یک سال در کارخانه 616500 مترمکعب محاسبه شد (با فرض ۲۴ روز کاری در ماه).

مقدار آب مصرفی در بویلرها و مقدار آب تبخیرشده: اطلاعات به دست آمده از میزان بخار آب در دیگ های بخار و بویلرها برای تولید همه محصولات شوینده در کارخانه با استفاده از کنترلهای ثبت میزان آب در قسمت های مربوطه، توسط کارشناسان کارخانه برای هر ماه از سال ۲۰۱۹ اندازه گیری و ثبت شده است. رد پای آب مصرفی در بویلرها و میزان تبخیر آب طبق قرائت کنترلهای اندازه گیری آب در این قسمت مطابق جدول ۸ برآورد شده است.

به آب‌های زراعی ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر (معادل ۲۰۰ گرم بر مترمکعب) در نظر گرفته می‌شود.

تولید کل کارخانه که اعم از مواد شوینده مایع، مواد شوینده پودری و مواد شوینده اسیدی است، معادل ۱۱۰۲۳۷ تن در سال و نیز طبق جدول ۸، کل پساب ناشی از تولیدات کارخانه ۳۳۱۳۱ مترمکعب در سال برآورد شده است. میزان آب خاکستری محاسبه شده برای رساندن کیفیت کل پساب خروجی از کارخانه به شرایط مطلوب برای آبیاری زمین‌های زراعی اطراف کارخانه معادل ۱۵۹۸۲۳۹ مترمکعب محاسبه شده است (جدول ۱۰). در نتیجه، میزان *Yield* حدود ۳/۳ تن بر مترمکعب است. بنابراین، میزان آب خاکستری (*Wfgray*) برای تولید یک تن محصول مواد شوینده (مواد شوینده مایع، پودر و جرم‌گیرها و پاک‌کننده‌های اسیدی) برای کل کارخانه، ۱۴/۵ مترمکعب محاسبه شده است.

اطلاعاتی درباره غلظت طبیعی املاح در این پژوهش در دسترس نیست، مقدار آن برابر صفر در نظر گرفته می‌شود، *Yield* عملکرد محصول (تن بر مترمکعب) است. جدول ۹ میزان غلظت املاح موجود در پساب تولید مواد شوینده (دترجنت‌ها) و نیز استاندارد غلظت املاح موجود برای تخلیه به منابع آب‌های مختلف را نشان می‌دهد.

برای محاسبه رد پای آب خاکستری، از COD (اکسیژن مورد نیاز شیمیایی و معرف ناخالصی‌های آلی) به دلیل اهمیت و غلظت بسیار زیاد در فاضلاب کارخانه یادشده استفاده می‌شود که طبق جدول ۹، میانگین غلظت آن ۹۶۴۸ میلی‌گرم در لیتر (معادل ۹۶۴۸ گرم بر مترمکعب) است. میزان حداکثر غلظت مجاز COD طبق استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست اندازه‌گیری شده و دارای مقادیر جدول ۸ است. از آنجا که پساب خروجی کارخانه پس از تصفیه برای آبیاری زمین‌های کشاورزی اطراف استفاده می‌شود، مطابق جدول ۹، میزان حداکثر استاندارد غلظت COD برای تخلیه

جدول ۹. مقایسه میانگین کیفیت فاضلاب صنایع تولید صنایع شیمیایی (صابون و دترجنت) با استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست (۲۴)

پارامترهای اصلی	میزان املاح موجود صنایع تولید صابون و دترجنت‌ها	استاندارد تخلیه آب‌های سطحی	استاندارد تخلیه آب‌های زیرزمینی	استاندارد تخلیه آب‌های زراعی
PH	۱۴- ۴/۵	۸/۵-۶/۵	۵-۹	۶- ۸/۵
کدورت	۲۶۵	۵۰	-	۵۰
قلیابیت	۶۷۰	-	-	-
TSS	۱۲۷۵	۴۰	-	۱۰۰
BOD5	۳۲۰۰-۲۵۹۰	۵۰	۵۰	۱۰۰
COD	۱۳۰۴۰- ۶۲۵۶	۱۰۰	۱۰۰	۲۰۰
MBAS	۱۱۷۱- ۲۳۰	-	-	-
BOD5 /COD	۰/۴۶- ۰/۱۸	۰,۳	۰,۳	۰,۳

منبع: استاندارد بررسی کمی-کیفی پساب‌ها و آب‌های برگشتی

جدول ۱۰. رد پای آب خاکستری کارخانه تولید مواد شوینده (مترمکعب)

نوع محصول	رد پای آب خاکستری (m^3)
مایع	۸۳۰۸۲۰
پودر	۶۰۴۸۵۱
جرم‌گیرها و پاک‌کننده‌های اسیدی	۱۶۲۵۶۸
مجموع رد پای آب خاکستری (m^3)	۱۵۹۸۲۳۹

شوینده از آنجا که میزان تولید در ماه‌های مختلف مقدار متفاوتی است، بنابراین سفارش تعداد ظروف بسته‌بندی نیز برای میزان تولیدات مختلف تفاوت دارد. مصرف معمول مواد

رد پای آب بسته‌بندی محصول بسته‌بندی محصولات تولیدشده در کارخانه مواد شوینده در سایزها و ابعاد مختلف است. در کارخانه‌های تولید مواد

بسته‌بندی یک هزار گرمی، ۳۸ گرم است که با توجه به کل تولید مواد شوینده مایع و جرم‌گیرها به حدود ۲۶۰۳/۶۸ تن پلاستیک نیاز است. با توجه به جدول ۱۳، میزان کل رد پای آب برای این مقدار پلاستیک، ۴۹۴۷۰۰ مترمکعب است. همچنین، مقدار کاغذ استفاده شده برای بسته‌بندی تولید محصولات پودری در اندازه استاندارد ۵۰۰ گرمی، ۴۵ گرم است. کل تولیدات مواد شوینده پودری، ۴۱۷۱۹ تن در تولید یک سال محصول است. بر اساس جدول ۱۰، مقدار رد پای آب برای تولید یک تن کاغذ بسته‌بندی بهداشتی بین ۱۰-۱۵ مترمکعب (که به صورت میانگین ۱۲/۵ مترمکعب) است. برای بسته‌بندی تولید یک سال محصولات شوینده پودری کارخانه، ۳۷۵۵ تن کاغذ بهداشتی لازم است که رد پای آب برای آن ۴۶۹۳۴ مترمکعب است.

شوینده مایع و اسیدی در جامعه، عموماً به صورت ظروف پلاستیکی یک‌لیتری با وزن ۳۸ گرم و برای مواد شوینده پودری غالباً با بسته‌بندی‌های ۵۰۰ گرمی با وزن خالص بسته مقوایی ۴۵ گرم است. بنابراین، با در اختیار داشتن میزان تولیدات مواد شوینده مایع و اسیدی و نیز پودرهای شست‌وشو در کارخانه و تحقیقات پیشین برای محاسبه رد پای آب تولید کاغذ و مقوا و پلاستیک در واحد تولید آن‌ها، می‌توان میزان رد پای آب در بسته‌بندی محصولات را محاسبه کرد (جدول‌های ۱۱ و ۱۲).

کل تولیدات محصولات شوینده‌ای که بسته‌بندی پلاستیکی یک‌لیتری (۱۰۰۰ گرم) دارند، ۶۸۵۱۸ تن در سال است که شامل مواد شوینده مایع و جرم‌گیرهای اسیدی می‌شود. وزن مقدار پلاستیک استفاده شده برای هر

جدول ۱۱. میزان مصرف استاندارد آب در واحدهای تولید انواع کاغذ و مقوا (m^3/ton) [۱۸]

نوع کاغذ	مترمکعب به ازای هر تن کاغذ تولیدشده
کاغذ روزنامه	۶-۱۲
کاغذهای ظریف	۵-۱۰
کاغذهایی با اتو زنی تکمیلی	۱۰-۱۵
کاغذ بهداشتی	۱۰-۱۵
کاغذ سبک اندودشده	۱۰-۲۰
مقوای لاینر	۲-۱۰
کاغذ فلوئینگ	۲-۱۰
مقوای چندلایه	۸-۱۵

جدول ۱۲. میزان مصرف استاندارد آب در واحد تولید پلاستیک (m^3/ton) [۱۸]

نوع بسته‌بندی	مترمکعب به ازای هر تن پلاستیک تولیدشده
پلاستیک	۱۹۰

جدول ۱۳. میزان رد پای آب بسته‌بندی برای تولیدات سال ۲۰۱۹ محصولات شوینده کارخانه (m^3)

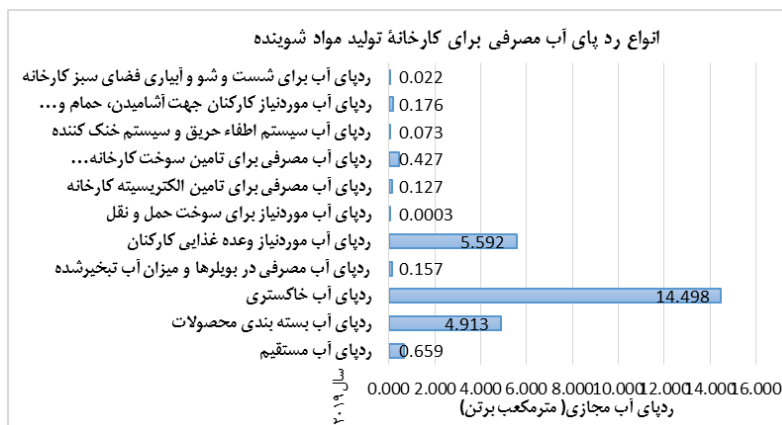
موارد	رد پای آب بسته‌بندی محصولات مواد شوینده
بسته‌بندی پلاستیکی برای مواد شوینده مایع و اسیدی	۴۹۴۷۰۰
بسته‌بندی با مقوای بهداشتی برای مواد شوینده پودری	۴۶۹۳۴
مجموع رد پای آب بسته‌بندی	۵۴۱۶۴۴

مقایسه رد پای آب مصارف مختلف غیرمستقیم در تولیدات کارخانه مواد شوینده و پیشنهادها برای بررسی حساسیت مدل رد پای آب پیشنهادی به عوامل مصرف آب در نظر گرفته شده در محدوده مرز سیستم، یک مقایسه انجام شده است. بر اساس پارامترهای مطالعه شده در

رد پای آب مجازی کل برای تولیدات کارخانه مواد شوینده، از مجموع رد پای آب مستقیم و غیرمستقیم کارخانه محاسبه می‌شود. بنابراین، رد پای آب کارخانه برای یک تن محصول مواد شوینده، ۲۶/۶۴ مترمکعب است.

خنک‌کننده‌ها، آب مورد نیاز کارکنان، شست‌وشوی کارخانه و آبیاری فضای سبز هستند. بنابراین، نیاز است تا حساسیت مقدار رد پای آب کلی کارخانه مواد شوینده نسبت به پارامترهای یادشده مشخص شود. بنابراین، از روش مقایسه پارامترها از نظر حساسیت آنها در شکل ۳ استفاده شده است.

کارخانه تولید مواد شوینده، پارامترهای تأثیرگذار بر رد پای آب کلی کارخانه تولید مواد شوینده مطالعه شده، آب مستقیم، بسته‌بندی محصولات، آب خاکستری، بویلرها و آب تبخیرشده، وعده غذایی کارکنان، سوخت حمل‌ونقل، الکتریسیته، گاز طبیعی، سیستم اطفای حریق و



شکل ۳. مقایسه انواع رد پای آب مصرفی و عوامل مختلف در کارخانه تولید مواد شوینده

پای آب مجازی مربوط به نیروی انسانی را به کمترین میزان رساند. هرچند این امر ممکن است به افزایش رد پای آب مجازی انرژی در نتیجه استفاده از ماشین به جای نیروی انسانی منجر شود و بررسی این تأثیر می‌تواند موضوع مطالعات آینده باشد. از سوی دیگر، می‌توان با بهینه‌سازی فرایند ساخت محصول سبب کاهش نیروی انسانی و دستگاه‌های تولیدی شد.

مقدار رد پای آب حمل‌ونقل کارکنان نیز در مقایسه با سایر رد پاهای آب غیرمستقیم بسیار ناچیز است، اما می‌توان در مورد بهینه‌سازی مصرف سوخت نیز اظهار نظر کرد. برای مثال، می‌توان از خودروهای برقی استفاده کرد. همان‌طور که گفته شد، تأمین مواد و مصالح اولیه در چرخه تأمین و بارگیری و ارسال آنها در مرز سیستم (محدوده مطالعه حاضر) قرار نگرفتند.

رد پای آب بسته‌بندی محصولات نیز حدود ۱۸ درصد از رد پای آب کل کارخانه و ۱۹ درصد از رد پای آب غیرمستقیم را به خود اختصاص می‌دهد. یکی از روش‌های کاهش بسته‌بندی محصولات این است که می‌توان پیشنهادهایی را به کارخانه و شرکت‌های تولیدی برای بسته‌بندی‌های خلاق با کمترین مصرف کاغذ و پلاستیک ارائه داد. همچنین، می‌توان از مواد بازیافتی برای بسته‌بندی

همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است، با افزایش مقدار هر یک از پارامترها، رد پای کلی آب افزایش می‌یابد. بیشترین موارد مصرف آب را به ترتیب رد پای آب خاکستری، رد پای آب وعده غذایی کارکنان و رد پای آب بسته‌بندی به خود اختصاص داده‌اند. پس از آن، رد پای آب مستقیم و رد پای آب برای گاز طبیعی، بیشترین موارد مصرف را دارند و بیشترین تأثیر را روی رد پای آب کلی کارخانه می‌گذارند.

درخور یادآوری است که رد پای آب تغذیه کارکنان، بیان‌کننده ارتباط مصرف مجازی آب با به‌کارگیری نیروی انسانی در صنایع است. وجود بیش از ۰/۵ میلیون مترمکعب رد پای آب در این بخش با سهم ۲۱ درصد از رد پای آب غیرمستقیم و ۲۰ درصد از رد پای کلی آب کارخانه، تأثیر درخور تأملی در افزایش رد پای آب کلی کارخانه داشته است. شاید در نگاه اول، وارد کردن این مقدار در محاسبات، نامعقول به نظر برسد، اما همان‌طور که استفاده از منابع انرژی با رد پای آب ارتباط پیدا می‌کند، استفاده از نیروی انسانی نیز از طریق تغذیه و آب آشامیدنی مصرفی کارکنان طی ساعات‌های حضور در کارخانه به رد پای آب مجازی مرتبط می‌شود. درواقع، با کاهش تعداد نیروی انسانی از طریق به‌روزرسانی تجهیزات کارخانه و خودکارسازی مراحل تولید، می‌توان رد

مگاوات) است، اما باید توجه داشت در همه مناطق یک کشور امکان تولید الکتریسیته از نیروی باد وجود ندارد. تولید الکتریسیته با استفاده از نیروی خورشید در اقلیم ایران کارایی بیشتری دارد و بر اساس جدول ۱۴ رد پای آب تولید الکتریسیته به وسیله نیروی خورشید برابر ۱۴۰ مترمکعب بر تراژول (۵۰۰ لیتر بر مگاوات) است.

جدول ۱۴. میانگین جهانی رد پای الکتریسیته و گرمای تولیدی بر حسب واحد مترمکعب بر تراژول (۲۰۰۸-۲۰۱۲) [۸]

نوع انرژی	باد	خورشید	گاز طبیعی	زمین گرمایی	زغال سنگ	نفت	هسته ای	برق آبی	هیضم	میانگین کل
میانگین رد پای آب	۱/۳	۱۴۰	۲۴۷	۳۴۲	۴۹۵	۳۴۲	۶۷۸	۱۵۱۰۰	۱۵۶۴۰۰	۴۲۴۱

استفاده کرد. می توان برای کاهش رد پای الکتریسیته، از منابع تجدیدپذیر استفاده کرد. بر اساس نتایج، بهترین نوع انرژی مصرفی برای کارخانه ها از نظر رد پای آب کمتر، الکتریسیته ایجاد شده توسط توربین های بادی است. بر اساس جدول ۱۴ مقدار میانگین جهانی رد پای آب تولید الکتریسیته از نیروی باد برابر ۱/۳ مترمکعب بر تراژول (۴/۶۸ لیتر بر

روش های مفید برای تصفیه به جای استفاده از اضافه کردن آب ارائه داد. پساب ناشی از تولید و فاضلاب انسانی در واحدهای صنعتی تولید مواد شوینده را در انتها به داخل حوضچه آب خاکستری می ریزند. در مجموع، مقدار کل پساب خروجی از یک کارخانه تولید محصولات شوینده اعم از محصولات شوینده مایع (مایع ظرف شویی و دست شویی)، پودرهای شوینده، و اسیدها (جرم گیرها و پاک کننده ها) ۳۳۱۳۱ مترمکعب برای یک سال (۲۰۱۹) است و مقدار آب خاکستری برای رساندن کیفیت این پساب به حد مطلوب ۱۵۹۸۲۳۹ مترمکعب است. بنابراین، این مقدار آب خاکستری حدود ۴۸ برابر میزان پساب خروجی از کارخانه در سال است که مقدار درخور توجهی را به خود اختصاص داده است.

تخلیه فاضلاب های صنایع شوینده و پاک کننده به محیط زیست به دلیل خصوصیات فیزیکی و شیمیایی ویژه ای که دارند، زیان های جبران ناپذیری را به همراه خواهد داشت. از طرفی، فاضلاب این صنایع از قدرت تصفیه پذیری بیولوژیکی پایین به علت کم بودن نسبت COD/BOD5 برخوردار است. امروزه، فرایند اکسیداسیون پیشرفته یکی از فرایندهای کارایی به کار گرفته شده برای تصفیه این فاضلاب ها به شمار می رود. هدف از تحقیق در این قسمت، کاهش اثر رد پای آب خاکستری برای حذف عوامل مهم در پساب خروجی این صنعت از جمله دترجنت آنیونیک، حذف COD، BOD و افزایش نسبت COD/BOD این فاضلاب ها با استفاده از روش اکسیداسیون پیشرفته (فرایند فنتون) است. همچنین، روش های تصفیه و حذف مواد و املاح موجود در این نوع پساب ها نیز گفته شده است.

برای کاهش رد پای آب به منظور آبیاری فضای سبز کارخانه می توان از سیستم های آبیاری قطره ای برای درختان استفاده کرد. همچنین، در فصول دارای بارندگی که نیاز به آبیاری فضای سبز ندارد، می توان آب نزولات آسمانی مانند باران را ذخیره و جمع آوری کرده و استفاده کرد.

بر اساس نتایج پژوهش مک اونن و همکاران، از میان سوخت های فسیلی، گاز طبیعی کمترین مقدار رد پای آب را دارد. همان طور که پیش تر نیز گفته شد، با توجه به فراوانی گاز طبیعی در ایران، به نظر می رسد در حال حاضر گاز طبیعی، مناسب ترین سوخت برای تأمین انرژی صنایع از لحاظ رد پای آب است، اما باید مسائل مربوط به رد پای کربن در استفاده از سوخت های فسیلی نیز در نظر گرفته شود. بر همین اساس، اهمیت تولید الکتریسیته از منابع تجدیدپذیر دوچندان می شود، زیرا علاوه بر کاهش چشمگیر رد پای کربن، رد پای آب نیز به میزان مناسبی کاهش خواهد یافت.

صنایع بزرگ تولیدکننده باید با به روزرسانی مداوم تجهیزات، بازده کارخانه را افزایش دهند و مقدار مصرف انرژی را به میزان کمینه برسانند. علاوه بر این، صنایع می توانند به اقتضای شرایط محیطی آن منطقه با استفاده از تجهیزات اختصاصی تولید الکتریسیته از منابع تجدیدپذیر، تمام و یا قسمتی از نیروی الکتریسیته مورد نیاز خود را تأمین کنند.

همچنین، برای کاهش رد پای آب خاکستری نیز با توجه به وجود تصفیه خانه در کارخانه یاد شده و یا با در نظر گرفتن اینکه در شهرک های صنعتی چندین تصفیه خانه موجود است، می توان راهکارهایی از جمله

انعقاد، ستون جذب، ازن زنی، UV/H₂O₂ و فرایند فنتون برای حذف و یا کاهش دترجنت‌های مختلف مثل دترجنت‌های آنیونی ABS و LAS استفاده می‌شود. در تحقیقاتی که آقای برگن دال روی کارایی فرایند فنتون برای کاهش COD فاضلاب صنعتی انجام داد، این فرایند توانایی کاهش بیش از ۹۶ درصد COD را داشت. تصفیه این فاضلاب‌ها به علت وجود ترکیباتی با تجزیه‌پذیری کم و یا غیر قابل تجزیه مشکل است، بنابراین روش‌های بیولوژیکی کارایی لازم برای تصفیه را نشان نمی‌دهند.

فرایند پیش‌تصفیه آب شامل هوادهی^۱، کلرزنی^۲، زلال‌سازی^۳، فیلتراسیون^۴ می‌شود. فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته به دلیل پایداری شیمیایی زیاد آلاینده‌های صنعتی یکی از فرایندهای مؤثر تصفیه پساب‌های صنعتی هستند. اکسیداسیون شیمیایی برای حذف کامل مواد، روشی گران‌قیمت است. امروزه به‌منظور افزایش کارایی و همچنین، کاهش هزینه‌های تصفیه، روش‌های بیولوژیکی به‌عنوان مکمل روش‌های اکسیداسیون پیشرفته استفاده می‌شوند که به آن‌ها روش تلفیقی گفته می‌شود.

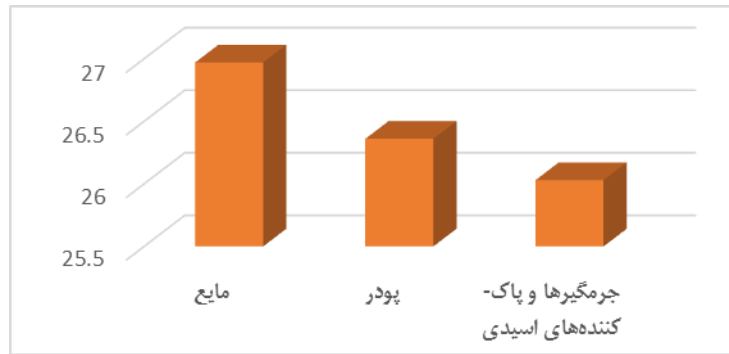
نتیجه‌گیری

با توجه به قرارگیری ایران در منطقه خشک و نیمه‌خشک و بحران آبی موجود، نیاز به ارائه راهکارهایی برای کاهش مصرف آب در زمینه‌های مختلف بیشتر از قبل احساس می‌شود. کارخانه‌ها و صنایع مختلف، یکی از مراکز اصلی مصرف انرژی و آب در جهان هستند. موضوع مصرف انرژی و ارتباط آن با رد پای آب از موضوعاتی است که تا کنون کمتر به آنها توجه شده است. مقدار رد پای آب کمتر، نه‌تنها نشان‌دهنده صرفه‌جویی در منابع آب است، بلکه نمایانگر استفاده بهینه از منابع انرژی و انتخاب منبع مناسب انرژی مصرفی است. رد پای آب کلی کارخانه مطالعه‌شده با ظرفیت تولید مواد شوینده فعلی، سالانه ۲۹۳۷۴۳۱ مترمکعب معادل ۲۶/۶۴ مترمکعب به ازای تولید یک‌تن از انواع مواد شوینده برآورد شده است.

در این کارخانه انواع محصولات با ساختارهای متفاوت فیزیکی و شیمیایی تولید می‌شود، بنابراین فاضلاب تولیدی نیز مطابق نتایج آزمایش‌های انجام‌گرفته از نظر کیفی تغییرات وسیعی را شامل می‌شود. طبق آزمایش‌های انجام‌شده از نمونه پساب خروجی از کارخانه غلظت اولیه پارامترهای MBAS^۳ COD و BOD₅ که به‌ترتیب برابر با ۴۷۰، ۸۷۵۰ و ۲۹۲۴ میلی‌گرم در لیتر گزارش شدند، در ضمن نسبت BOD₅ به COD با توجه به غلظت اولیه آنها در پساب برابر ۰/۳۳۴ گزارش شد. این نتایج نشان می‌دهد بار آلی COD زیاد و با توجه به واحدهای فعال در کارخانه از ۶۲۵۶ تا ۱۳۰۴۰ متغیر است، همچنین غلظت دترجنت‌های با خاصیت کف‌کنندگی و تجزیه‌پذیری بیولوژیکی کم در فاضلاب زیاد است.

علاوه بر آن، دما در محدوده ۲۰ تا ۶۵ درجه سانتی‌گراد و PH با دامنه تغییرات ۵/۴ تا ۱۴ به علت تغییرات وسیع می‌تواند به‌عنوان عوامل بازدارنده در تصفیه بیولوژیکی عمل کنند، هرچند طی فرایند اکسیداسیون ۴۰ درصد از غلظت دترجنت و بیش از ۳۰ درصد از بار آلی COD کاهش می‌یابد. اما تغییر چشمگیری در نسبت COD/BOD₅ به وجود نمی‌آید که دلیل آن شاید حذف مقداری از مواد تجزیه‌پذیر بیولوژیکی در فرایند اکسیداسیون باشد. این نتایج همچنین در مطالعات مشابه به اثبات رسیده است. مطالعه آ- پاپا دو پولوس نشان می‌دهد فاضلاب این صنایع دارای دامنه تغییرات PH از ۲/۷ تا ۱۱/۶ و نسبت COD/BOD₅ کم و حدود ۰/۱ است. بنابراین، سیستم‌های بیولوژیکی، کارایی مناسبی را در تصفیه این‌گونه فاضلاب‌ها از خود نشان نمی‌دهند. در مطالعه محوی و همکاران، پارامترهای شیمیایی فاضلاب این صنایع بررسی شد که نتایج آن pH حدود ۱۱ و میانگین غلظت COD و MBAS به‌ترتیب برابر با 4550 mg/l و ۴۳۰ mg/l را نشان می‌دهد. با توجه به این نتایج، روش‌های تصفیه متداول کارایی چندانی در تصفیه پساب این صنایع نشان نمی‌دهند. بنابراین، پیشنهاد می‌شود در مواردی که نسبت COD/BOD₅ مناسب نیست، با استفاده از روش تصفیه مشترک فاضلاب صنعتی و فاضلاب خانگی، این نسبت را اصلاح کرد و یا با به‌کارگیری روش‌های پیش‌تصفیه و تصفیه تلفیقی شیمیایی-بیولوژیک، از بار آلی فاضلاب بکاهیم و آن را برای ورود به فرایندهای بیولوژیکی آماده کنیم. بر همین اساس، در مطالعات از روش‌های مختلف مثل فرایند

1. Aeration
2. Chlorination
3. Clarification
4. Filtration



شکل ۴. رد پای آب مجازی در محصولات شوینده (m^3/ton)

از کارخانه‌های با رد پای آب بحرانی در اختیار داشته باشند. پژوهش حاضر نشان می‌دهد پس از رد پای آب خاکستری، رد پای آب تأمین وعده غذایی کارکنان، بیشترین میزان را به خود اختصاص داده است. رد پای آب وعده‌های غذایی کارکنان جزء موارد درخور تأمل است و می‌توان علت آن را در رد پای آب در محصولات کشاورزی جست‌وجو کرد.

منابع

- [1]. Chapagain, A.K., Hoekstra, A.Y., Savenije, H. and et al. 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*.2006; 60(1), PP. 186-203.
- [2]. Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M. and et al. Sustainable cement production- present and future, *Cement and Concrete Research*.2001; 41(7), PP. 642-650.
- [3]. Aldaya M.M., Chapagain A.K., and Mekonnen M.M. and et al. The water footprint assessment manual: setting the global standard, Routledge.2012.
- [4]. Ercin, A.E., Aldaya, M.M. and Hoekstre, A.Y. The water footprint of soy milk and soy burger and equivalent animal products, *Ecological Indicators*.2012; 18, pp.392-402.
- [5]. Chico, D., Aldaya, M.M. and Garrido, A. A water footprint assessment of a pair of jeans: The influence of agricultural policies on the sustainability of consumer products, *Journal of Cleaner Production*.2013;57, pp. 238-248.
- [6]. Van Oel, P. and Hoekstra, A.Y. Towards quantification of the water footprint of paper: A first estimate of its consumptive component, *Water Resources Management*.2013; 26(3), pp. 733-749.

مجموع رد پای آب مجازی غیرمستقیم در کارخانه یادشده ۲۸۶۴۷۹۲ مترمکعب محاسبه شده است. این مقدار که بیشتر از مقدار آب مجازی مستقیم است، بسیار اهمیت دارد و حدود ۴۰ برابر آب مستقیم کارخانه است. این اطلاعات نشان می‌دهد بخش اصلی مصرف آب کارخانه مربوط به مصارف غیرمستقیم است، در حالی که رد پای آب غیرمستقیم، موضوعی ناشناخته برای این صنعت و سایر صنایع تولیدی محسوب می‌شود. همچنین، در میان مصارف رد پای آب غیرمستقیم، میزان آب خاکستری محاسبه شده برای تبدیل پساب خروجی از کارخانه به کیفیت استاندارد برای استفاده زمین‌های زراعی مجاور، میزان بسیار زیادی را به خود اختصاص داده است که آلودگی بسیار زیاد و غلظت زیاد املاح در پساب این‌گونه صنایع را نشان می‌دهد و دقت و تمرکز بیشتر برای تصفیه این حجم زیاد از آب برای مصارف مختلف از جمله آبیاری زمین‌های کشاورزی و یا بازگشت به چرخه تولید را نیاز دارد.

پژوهش حاضر علاوه بر آشکار کردن جنبه‌های پنهان ارتباط بین رد پای آب و انرژی مصرفی، روشی را برای محاسبه رد پای آب غیرمستقیم صورت‌های مختلف انرژی، حمل‌ونقل و تأثیرات انسانی در کارخانه تولید مواد شوینده ارائه کرده است که برای تمامی کارخانه‌های تولید مواد شوینده با مصرف انواع مختلف سوخت قابل استفاده است و با ایجاد تغییراتی اندک برای هر کارخانه‌ای قابل استفاده است. روش استفاده شده، امکان ایجاد مقایسه‌ای را بر اساس معیار رد پای آب مجازی فراهم می‌آورد. همچنین، این مدل می‌تواند به سیاست‌گذاران این امکان را بدهد که ابزار مناسبی برای تشویق کارخانه‌های تولید مواد شوینده با رد پای آب کمتر و یا حتی جریمه کردن و اخذ عوارض

- [7]. King C.W., and Webber M.E. and et al. Water intensity of transpotation, ACS Publication.2008.
- [8]. Hosseinian, M. Nezam aleslami, r. Calculation of water traces of cement production with the approach of reducing water consumption through optimization. Energy Consumption (A Case Study in Western Iran), Sharif Civil Engineering.2017; Volume 2-3-35, Number 1/3, pp.
- [9]. Herath, I., Deurer, M., Horne, D. and et al. The water footprint of hydroelectricity: A methodological comparison from a case study in New Zealand, Journal of cleaner production.2011; 19(14), PP. 1582-1589.
- [10]. Mohammad, Y. Virtual Water Review and Water Resources Management, Biological Sciences and Biotechnology Studies.2006; Volume 2, Number 1 - PP 18-24.
- [11]. Bod, E.M. An analysis of cement industry, *Cement Technology*.2014; 73, pp. 120 (In Persian)
- [12]. Ramezani Etedali, H. Shokoohi, A. Mojtaba, A. Using the concept of virtual water footprint in the production of main products to overcome the water crisis in Qazvin region, Journal of Water and Soil (Agricultural Sciences and Industries).2016; Volume 31, Number 2, pp. 424-423.
- [13]. Mekonnen, M.M., Gerbens-Leenes, P. and Hoekstra, A.Y. The consumptive water footprint of electricity and heat: A global assessment, *Environmental science: Water research & Technology*.2015; 1(3), pp. 285-297.
- [14]. Industry, Mining and Trade Services and Information Port [http:// www. behinyab.ir](http://www.behinyab.ir)
- [15]. Williams, E.D. and Simmons, J.E. Water in the energy industry: An introduction.2017; www.bp.com/energysustainabilitychallenge.2013.
- [16]. Macknick, J., Newmark, R., Heath, G. and et al. A review of operational water consumption and withdrawal factors for electricity generating technologies.2011; Contract, 303, PP. 275-300.
- [17]. Spiess, W. Virtual Water and water footprint of food production and processing”, Encyclopedia of Agriculture and food systems2014; PP. 333-355.
- [18]. Iran Agricultural News Agency Portal, Virtual Water The amount of water used to produce each product.(<http://keshavarznews.ir>)
- [19]. Razavi, S. Davoodi, K. The role of virtual water in water resources management, Journal of Water and Sustainable Development.2013; First Year, pp. 9-18, No. 1.
- [20]. Downstream Petrochemical Industries Development Company. Preliminary Feasibility Studies of Detergent Production Project, Small Industries Organization and Industrial Towns of Iran.2017.
- [21]. Tahamipour, M. Abedi, S. Evaluation of Virtual Water Trade in Zanjan Province Industry Sector, Journal of Water and Sewerage.2015; No. 3.
- [22]. Atai, Z. Heydari, M. Identification of Detergent Products, Office of Export Development of Industrial and Mineral Products, Chemical and Petrochemical Products Table.2018.
- [23]. Alizadeh, A. Pourjafari Nejad, A. Neshat, A. Study of ecological footprint of water and virtual water indicators in pistachio and date products in Kerman province. Journal of Irrigation and Water Engineering.2013; Fourth Year, No. 13.
- [24]. Tahamipour, M. Dashtban Farooji, S. Javaherdi, S. Assessing the Trade of Iran's Industrial Products with Different Countries from the Perspective of Virtual Water, Quarterly Journal of Economics and Modeling.2017; Year 8, No. 30.
- [25]. Ajdari, A. Water footprints from production to consumption and an indicator of the impact of the consumption pattern of nations.2016; UNESCO Research Report No. 50-2011.
- [26]. J. Flynn, K. Guide to Water Use in Industry Volumes 1 and 2, Iranian Corrosion Association, translated by Mohammad Reza Nafri.2016.
- [27]. National Statistics Portal of Iran. 2020, Access site: <http://www.amar.org.ir>
- [28]. Chehregghni, H., Environment in Cement Industry, *Hazegh Publication* 2004. ,(Persian)
- [29]. Valderrama, C., Granados, R., Cortina, J. L. and et al. Implementation of best available techniques in cement manufacturing: A life-cycle assessment study , J. Clean. Prode.2012; 25, PP. 60-67.
- [30]. Chen, C., Habert, G., Bouzidi, Y. and et al. Environmental impact of cementproduction: Detail of the different processes and cement plant variability evaluation, J. clean. Prod.2010;18, PP. 478-485..’
- [31]. Cemex, “2014 Sustainable development report”, Building Resilient and Sustainable Urban Communities.2015.

- [32]. Allan, J. Virtual water: A strategic resource. Global solutions to regional deficits, *Groundwater*.1998; 36, PP. 545-456.
- [33]. Gao, C., Wang, D., Dong, H. and et al. Optimization and evaluation of steel industry's water-use system, *Journal of Cleaner Production*, 19(1), PP. 64-69.
- [34]. Hoekstra, A.Y. and Mekonnen, M.M. The water footprint of humanity, *Proceedings of The National Academy of Sciences*.2012; 109, PP. 3232-3237.
- [35]. Zhuo, L., Mekonnen, M.M. and Hoekstra, A.Y. The effect of inter-annual variability of consumption, production, trade and climate on crop-related green and blue water footprints and inter-regional virtual water trade: A study for china (1978-2008)", *Water Research*.2016; 94, PP.73-85.
- [36]. Cemex, "2014 Sustainable development report", *Building Resilient and Sustainable Urban Communities*.2015.
- [37]. Mekonnen, M.M. and Hoekstra, A.Y. A global assessment of the water footprint of farm animal products, *Ecosystems*.2012.15(3), PP. 401-415.
- [38]. Ge, L., Xie, G., Zhang, C. and et al. An evaluation of China's water footprint, *Water Resources Management*.2011; 25(10), PP. 2633-2647.
- [39]. Feng, K., Siu, Y.L, Guan, D. and et al. Assessing regional virtual water flows and water footprints in the Yellow River Basin China: A consumption based approach, *Applied Geography*.2012; 32(3), PP. 691-701
- [40]. Marceau, M.L., Nisbet, M.A. and VanGeem, M.G. Life cycle inventory of Portland Cement Manufacture, *Portland Cement Association*, Skokie, IL.2006.
- [41]. Mekonnen, M.M. and Hoekstra, A.Y. Water footprint benchmarks for crop production: A first global assessment, *Ecological indicators*.2014;46, PP. 214-233.
- [42]. Gu, Y., Xu, J., Keller, A.A. and et al. Calculation of water footprint of the iron and steel industry: A case study in Eastern china, *Journal of cleaner production*.2015; 92, PP. 247-281.
- [43]. Erkin, A.E., Aldaya, M.M. and Hoekstra, A.Y. Corporate water footprint accounting and impact assessment: The case of the water footprint of a sugar-containing carbonated beverage, *Water Resources Management*.2011;25(2), pp.721-741.
- [44]. Hoekstra A.Y., and Chapagain A.K. Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources. Blackwell Publishing, Oxford, UK.2008.
- [45]. Hoekstra A.Y., Chapagain A.K., Aldaya M.M., and Mekonnen M.M. Water footprint manual: State of the art 2009, Water Footprint Network, Enschede, the Netherlands.2009.
- [46]. Hoekstra A.Y., Chapagain A.K., Aldaya M.M., and Mekonnen M.M. The water footprint assessment manual: setting the global standard, Water Footprint Network, Enschede, the Netherlands.2011.
- [47]. Spiess, W. Virtual water and water footprint of food production and processing, *Encyclopedia of Agriculture and food Systems*.2014; PP. 333-355.