

# مدل محاسبه‌ی ردپای آب تولید سیمان با رویکرد کاهش مصرف آب از طریق بهینه‌سازی مصرف انرژی (یک مطالعه‌ی موردی در غرب ایران)

سید مهدی حسینیان\* (استادیار)

رضا نظام‌الاسلامی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۸)  
دوره‌ی ۲ - ۳۵، شماره‌ی ۳/۱، ص. ۱۲۳-۱۳۳، (پادداشت فنی)

در نوشتار حاضر، مدلی برای محاسبه‌ی ردپای آب در صنعت سیمان ارائه شده است که راهکار جامعی را برای محاسبه‌ی ردپای آب صورت‌های مختلف انرژی، حمل‌ونقل و اثر انسانی و چگونگی کاهش آن‌ها ارائه می‌کند. یک آنالیز مرز سیستم جهت استفاده‌ی مدل عملاً ارائه شده و کارخانه‌ی تولید سیمانی در غرب ایران به‌عنوان مطالعه‌ی موردی انتخاب و بررسی شده است. با استفاده از مدل ارائه شده، مقدار ردپای آب کلی کارخانه در سال ۱۳۹۶ برابر  $۳/۶۱۴/۰۰۰$  مترمکعب محاسبه شد که نشان‌دهنده‌ی سهم بالای تولید سیمان در مصرف آب و ریسک بقای صنعت سیمان در کشورهای خشک، مانند ایران است. استفاده از مدل ردپای آب ارائه شده در پژوهش حاضر نشان داد که با به‌کارگیری مفهوم شدت مصرف آب برای تولید هر تن سیمان در کارخانه‌ی مذکور برابر  $۲/۱۲۶$  مترمکعب است. براساس یافته‌های پژوهش حاضر، راهکارهایی برای کاهش ردپای آب ارائه شده است.

واژگان کلیدی: ردپای آب، آب مجازی، مصرف انرژی، تولید سیمان، کاهش مصرف آب.

## ۱. مقدمه

بودر خشک به درون کوره تغذیه می‌شوند.<sup>[۱]</sup> روش مورد بررسی در این نوشتار نیز براساس روش خشک است.

با وجود اینکه انتخاب روش خشک برای تولید سیمان اقدامی برای کاهش مصرف آب در این صنعت به‌شمار می‌رود،<sup>[۲]</sup> اما به‌صورت کلی به مسئله‌ی مصرف آب در صنعت سیمان کمتر توجه شده است و این موضوع می‌تواند در آینده‌ی نزدیک، به‌عنوان یکی از مشکلات اساسی صنعت سیمان در ایران و سایر کشورهای با اقلیم خشک مطرح شود.<sup>[۳]</sup> اهمیت مصرف آب در صنعت سیمان در ایران از دو جنبه مد نظر قرار می‌گیرد: اولاً، ایران با مصرف سالانه ۹۰ میلیارد مترمکعب آب و حدود ۸۰ میلیون نفر جمعیت، با توجه به محدودیت منابع آبی در مرز خشک‌سالی قرار دارد،<sup>[۴]</sup> ثانیاً، جهت تولید سالانه‌ی ۷۰ میلیون تن سیمان در کشور، حجم قابل توجهی آب مصرف می‌شود.<sup>[۵]</sup> با گسترش کارخانه‌های سیمان در مناطق مختلف، به‌ویژه در مناطق خشک، مشکل تأمین آب نمایان می‌شود.

شاخص فعلی اندازه‌گیری آب مصرفی در کارخانه‌های تولید سیمان با واحد مترمکعب آب مصرفی برای تولید هر تن سیمان بیان می‌شود.<sup>[۶]</sup> در شاخص مذکور، اندازه‌گیری آب تا حد زیادی به شیوه‌ی تولید و ماشین‌آلات استفاده‌شده در خطوط

صنعت سیمان به‌عنوان یکی از صنایع مهم مرتبط با ساخت‌وساز است. ایران به‌عنوان چهارمین تولیدکننده‌ی سیمان در دنیا حدود ۲٪ از سهم جهانی تولید سیمان را به خود اختصاص می‌دهد.<sup>[۱]</sup> ظرفیت اسمی تولید سیمان کشور برابر ۷۶ میلیون تن و سهم این صنعت در تولید ناخالص ملی (GDP) برابر ۰٫۸٪ است.<sup>[۱]</sup> سه کشور برتر جهان در تولید سیمان عبارت از: چین با تولید ۲۱۸۲ میلیون تن، هند با تولید ۲۳۴ میلیون تن و ایالات‌متحده با تولید ۷۹ میلیون تن در سال هستند.<sup>[۱]</sup>

روش‌های مرسوم تولید سیمان در دنیا شامل: تر، نیمه‌تر و خشک است.<sup>[۲]</sup> این تقسیم‌بندی براساس مواد خام ورودی به کوره، از نظر غلظت و میزان آب اضافه شده به آن‌هاست. مهم‌ترین و پرکاربردترین روش تولید سیمان در جهان، روش خشک است؛<sup>[۲]</sup> و سیستم تولید بیشتر کارخانه‌های سیمان کشور ایران نیز براساس روش مذکور است. در فرایند تولید سیمان به‌صورت خشک، مواد خام آسیاب و به‌صورت

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۴/۲۴، اصلاحیه ۱۳۹۶/۸/۱۴، پذیرش ۱۳۹۶/۸/۲۳.

DOI:10.24200/J30.2019.20918

که بیشتر مطالعات ردپای آب، [۲۰-۲۲] در زمینه‌ی ردپای آب کشاورزی انجام شده است.

محاسبه‌ی تخصصی ردپای آب تولیدات صنعتی با مطالعه‌ی از سال ۲۰۰۶، [۲۵] بر روی نخ آغاز شد و امروزه برای محصولات، از جمله: غذاها و نوشیدنی‌ها، [۲۶، ۲۷] منسوجات پارچه‌ی، [۲۸] و کاغذی، [۲۹] مواد معدنی و محصولاتی نظیر رایانه و خودرو انجام می‌گیرد. در یکی از پژوهش‌های ذکر شده (۲۰۱۵)، [۱۳] برای اولین بار به ردپای آب در صنعت فولاد توجه شد و از مفهوم ردپای آب مصرفی به‌جای شاخص‌های متداول مصرف آب (مصرف آب شرب به ازاء هر تن فولاد و یا مصرف آب به ازاء هر تن فولاد) در صنعت فولاد استفاده شد. مدل ارائه شده‌ی اخیر، شناخت خوبی از مسیر محاسبه‌ی ردپای آب برای سایر صنایع فراهم کرده است، اما عدم ارائه‌ی اطلاعات کافی برای محاسبه‌ی ردپای آب صورت‌های گوناگون انرژی، کاربرد این مدل را برای سایر صنایع با مشکل روبرو می‌سازد. هنوز پژوهش جامعی که ردپای آب را کاملاً در مراحل تولید یک محصول و چرخه‌ی تأمین آن محاسبه کند، انجام نشده است.

محاسبه‌ی ردپای آب برای تولید انرژی نیز هنوز با مشکلاتی مواجه است و در بررسی علت آن، ذکر شده است که مقدار بهره‌برداری از منابع آبی با توجه به مناطق جغرافیایی مختلف و روش‌های گوناگون تولید انرژی، متفاوت است. [۱۳] برای نمایش اهمیت موضوع ردپای آب در تولید انرژی می‌توان بیان کرد که توسعه‌ی پایدار آب و انرژی در مسائل صنعتی به‌صورت ناگسسته‌ی با یکدیگر در ارتباط هستند و بخش انرژی بعد از آبیاری، دومین مصرف‌کننده‌ی بزرگ منابع آبی در جهان است. [۳۰] تقریباً هر مرحله در چرخه‌ی تولید و تأمین انرژی طی روش‌های گوناگون نیازمند آب است، [۳۱، ۳۲] برای مثال آب مصرفی برای حفاری و برش (نفوذ) در اکتشاف نفت و گاز، [۳۳، ۳۴] و یا حجم قابل‌توجه آب، که برای فرایندهای خنک‌کاری در نیروگاه‌های برق حرارتی مصرف می‌شود. [۳۱، ۳۳-۳۶]

در پژوهش حاضر، مدلی جدید برای محاسبه‌ی ردپای آب در صنعت سیمان ارائه شده است، که با ایجاد تغییراتی برای سایر صنایع قابل کاربرد است و مصرف آب مستقیم و مجازی را حساب می‌کند. این مدل نوع انرژی مصرفی، حمل‌ونقل و اثر انسانی را در ردپای آب بررسی می‌کند. همچنین از یک آنالیز مرز سیستم جهت کاربردی کردن مدل در عمل استفاده کرده است. برای نمایش عملکرد مدل ارائه شده، یکی از بزرگ‌ترین کارخانه‌های تولید سیمان ایران واقع در غرب کشور با ظرفیت تولید سالانه‌ی ۱٫۷ میلیون تن سیمان بررسی شد.

در مطالعه‌ی حاضر سعی شده است با جمع‌آوری جدیدترین نتایج حاصل از بررسی ردپای آب انرژی‌های گوناگون، مسیر اندازه‌گیری ردپای آب چرخه‌ی تأمین هموار شود. اطلاعات مربوط به ردپای آب الکتریسیته و سوخت‌های مصرفی از پژوهش مک اونن و همکاران، [۳۷] و اطلاعات مربوط به ردپای آب فرآوری نفت خام از پژوهش ویلیامز و سیمونز، [۳۸] استخراج شدند. برای بررسی ارتباط بین ردپای آب مجازی و نیروی انسانی شاغل در کارخانه‌ی سیمان از مفهوم ردپای آب وعده‌های غذایی مصرفی کارکنان در ساعات کاری استفاده شد. همچنین به علت نبود معیار جامع برای محاسبه‌ی ردپای آب هر وعده‌ی غذایی، از یک رابطه‌ی ابتکاری با استفاده از ایده‌ی محاسبه‌ی ردپای اکولوژیک<sup>۸</sup> وعده‌های غذایی، استفاده شد. پژوهش حاضر می‌تواند سهمی در تولید سیمان دوستدار محیط‌زیست داشته باشد. در نوشتار حاضر، در ابتدا روش محاسبه‌ی ردپای آب توضیح داده شده است. سپس آنالیز مرز سیستم ارائه و بعد مدل ردپای آب توسعه داده شده است. در انتها، در مورد کاربرد مدل در کارخانه‌ی سیمانی بحث شده است.

تولید بستگی دارد. ظرفیت تولید واحد نیز - هرچند به مقدار کمتر - در حجم آب مصرفی مؤثر است. [۳] پژوهش‌های مختلفی در زمینه‌ی مصرف آب در صنعت سیمان با استفاده از شاخص ذکر شده وجود دارد که تمرکز آن‌ها روی مصرف مستقیم آب در تولید سیمان است. مثلاً والدردما<sup>۲</sup> (۲۰۱۲)، مطالعه‌ی با محوریت مقایسه‌ی مصرف آب در خطوط تولید معمولی سیمان و خطوط تولید با فناوری روز سیمان انجام داد، که نتایج برای خطوط تولید معمولی و با فناوری روز به ترتیب بیانگر مصرف ۰٫۵۵۶ و ۰٫۱۳۹ مترمکعب آب برای هر تن سیمان است. [۴] چن<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۰)، مصرف آب برای تولید کلیت‌گر سیمان فرانسوی را حدود ۰٫۲ مترمکعب بر هر تن بیان کرده‌اند. [۵] آمار میانگین جهانی مصرف آب در کارخانه‌های تولید سیمان هر ساله توسط سازمان‌های Holcim، Cemex و Lafarge ارائه می‌شود. بر این اساس میانگین جهانی مصرف مستقیم آب در تولید سیمان براساس برخی مطالعات به ترتیب، برابر ۰٫۳۶۶، ۰٫۱۸۵ و ۰٫۳۱۴ مترمکعب بر تن است. [۶-۸] این مقادیر با اطلاعات ارائه شده توسط PCA<sup>۴</sup> مطابقت دارد. [۹]

در ایران نیز مطالعات محدودی در زمینه‌ی مصرف آب در صنعت سیمان انجام شده است. مثلاً چهرگانی (۱۳۷۴) نشان داده است که در کارخانه‌ی سیمان قائن، روزانه حدود ۲۳۰ مترمکعب آب مورد نیاز بوده است. این مقدار با توجه به اینکه مصرف سرانه‌ی آب در شهر قائن ۱۰۰ تا ۱۵۰ لیتر برای هر نفر است، برابر با مصرف ۱۵ الی ۲۰ هزار نفر است. [۴] این مقادیر بدین معنی است که کارخانه‌ی سیمان قائن به تنهایی از کل مردم شهر قائن آب بیشتری مصرف می‌کند. در پژوهش اخیر، متأسفانه اطلاعات کاملی در مورد مقدار مصرف آب به ازاء تولید هر تن سیمان ارائه نشده است.

شاخص فعلی برای بیان وضعیت استفاده از منابع آب در صنعت سیمان از تأثیر آب مجازی<sup>۵</sup> در تولید سیمان و آثار زیست‌محیطی ناشی از تخلیه‌ی فاضلاب‌ها صرف‌نظر می‌کند. [۳] مفهوم آب مجازی بیانگر آب موردنیاز در چرخه‌ی تأمین، در فرایند تولید یک محصول است. [۱۰، ۱۱] برای مثال، آب موردنیاز برای تولید انرژی مصرفی (الکتریسیته، گاز طبیعی و غیره) در کارخانه‌های سیمان به‌عنوان آب مجازی برای این فعالیت به‌شمار می‌رود. [۱۲]

آب مجازی روش مشخصی برای محاسبه‌ی مصرف آب در فرایند تولید یک محصول روش مشخصی ارائه نمی‌کند و برای بررسی‌های جامع مصرف آب در صنایع کاربردی نیست. [۱۳] بنابراین، براساس نیاز به وجود یک شاخص و روش جامع برای محاسبه‌ی مقدار آب و ارزیابی خطرات روبروی منابع آب، هوکسترا<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۰۲) مفهوم ردپای آب<sup>۷</sup> را بیان کردند که به معنای مجموع آب مصرفی و شبکه‌ی آب‌های مجازی چرخه‌ی تأمین است و می‌تواند در مقیاس‌های مختلف برای یک فرایند، یک کارخانه، یک منطقه‌ی صنعتی، ناحیه و یا یک کشور بیان شود. [۱۳]

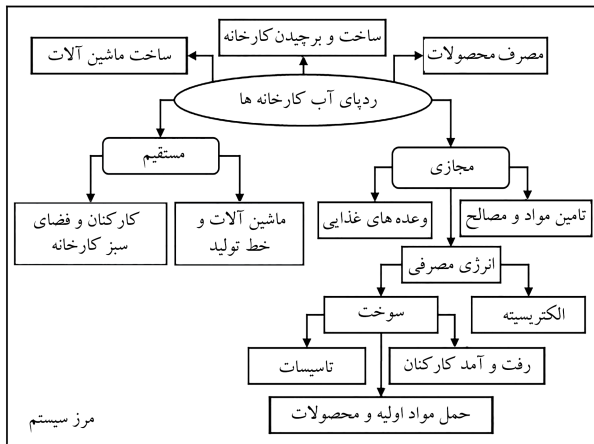
در بیان دقیق، ردپای آب یک محصول، به‌صورت مجموع مقدار آبی که به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم برای تولید یک محصول مصرف می‌شود، تعریف می‌شود، [۱۴] و بعد از بررسی مصرف آب در تمامی مراحل چرخه‌ی تولید، تخمین زده می‌شود. روند محاسبه برای انواع تولیدات و محصولات یکسان است و این محصول می‌تواند برای بخش کشاورزی، صنعتی و یا بخش خدماتی باشد. [۱۳]

مطالعات مهم انجام شده برای توسعه‌ی مفهوم ردپای آب تا به امروز شامل پژوهش‌هایی، نظیر: توسعه‌ی روش ارزیابی ردپای آب، [۱۴] کمی‌سازی ردپاهای آب در مقیاس زمانی و مکانی، [۱۵] تغییر و تحولات سالانه‌ی ردپای آب و آب مجازی، [۱۶] توسعه‌ی معیارهای ردپای آب برای محصولات کشاورزی، [۱۷، ۱۸] و توسعه‌ی سناریوهای آینده‌ی ردپای آب و آب مجازی، بوده است. [۱۹] قابل ذکر است

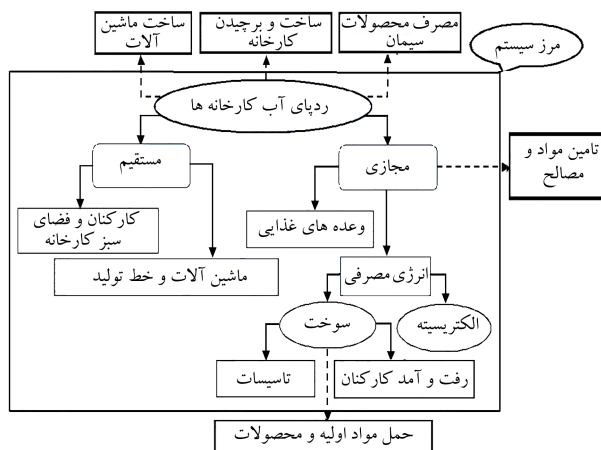
## ۲. روش پژوهش

### ۲.۱. روش‌های محاسبه‌ی ردپای آب

از دو روش برای محاسبه‌ی ردپای آب تولید محصول می‌توان استفاده کرد که عبارت‌اند از: روش مجموع زنجیره‌ها<sup>۹</sup> و روش مراحل جمع‌شونده<sup>۱۰</sup>. روش مجموع زنجیره‌ها، اصولاً برای سیستم‌های تولیدی که فقط یک محصول خروجی دارند، استفاده می‌شود.<sup>۱۱</sup> در روش مجموع زنجیره‌ها، ردپای آب محصول نهایی یک سیستم تولیدی از مجموع ردپاهای آب فرایندهای مختلف تولید، تقسیم بر مقدار کثی تولید آن محصول به دست می‌آید. روش مراحل جمع‌شونده، یک روش عمومی برای محاسبه‌ی ردپای آب است، که بر پایه‌ی مراحل نهایی تولید یک محصول و همچنین محاسبه‌ی ردپای آب چرخه‌ی تأمین محصولات اولیه قرار می‌گیرد.<sup>۱۲</sup> در روش مراحل جمع‌شونده فرض بر این است که چند ماده‌ی ورودی با یکدیگر، سازنده‌ی یک محصول خروجی هستند. در این مورد می‌توان ردپای آب محصول خروجی را با مجموع‌گیری ساده از ردپاهای آبی محصولات ورودی و اضافه کردن آن به ردپای آب مراحل تولید به دست آورد.<sup>۱۳</sup> هر دو روش محاسبه‌ی ردپای آب، نیازمند اطلاعات مفصل و با جزئیات زیادی هستند که این اطلاعات خصوصاً در صنایع بزرگ معمولاً محرمانه هستند و این امر محاسبه‌ی ردپای آب صنعتی و مدیریت مصرف آب را دشوار می‌سازد.<sup>۱۴</sup> مدل ارائه شده در پژوهش حاضر، به علت عمومیت روش مراحل جمع‌شونده،<sup>۱۲</sup> بر پایه‌ی روش مذکور قرار می‌گیرد. به‌طور کلی مفهوم مصرف آب ذکر شده در پژوهش حاضر به معنای آب برداشت شده از منابع آبی جهت مصارف مستقیم و غیرمستقیم (مانند مصارف آب برای تأمین انرژی) کارخانه است.



شکل ۱. مراحل تولید سیمان به روش خشک.<sup>[۲۰]</sup>



شکل ۲. مدل محاسبه‌ی ردپای آب (مرز سیستم) در کارخانه‌ها و صنایع.

و ردپای آب مواد و مصالح چرخه‌ی تأمین تعریف می‌شوند. مصرف انرژی در بیشتر کارخانه‌ها به دو صورت الکتریسیته و سوخت فسیلی است که در آنالیز سیستم، هرکدام تأثیر مستقیم در محاسبه‌ی ردپای آب کلی کارخانه دارند.

در شکل ۲، نمایش گرافیکی مدل جامع محاسبه‌ی ردپای آب (مرز سیستم) برای صنایع و کارخانه‌ها مشاهده می‌شود. عوامل در نظر گرفته شده برای محاسبه‌ی ردپای آب تقریباً برای همه‌ی کارخانه‌ها یکسان است. در صورتی که ردپای آب مواد و مصالح در چرخه‌ی تأمین مشخص باشد، از طریق عوامل در نظر گرفته شده در بخش ردپای آب مجازی، نتایج بخش مذکور در محاسبه‌ی ردپای آب کلی کارخانه وارد می‌شود. در صورتی که کارخانه‌ی مورد نظر فاقد یکی از عوامل مدنظر برای محاسبه‌ی ردپای آب نشان داده شده در سیستم باشد (برای مثال حمل مواد اولیه و محصولات در شکل ۲)، اثر عامل ذکر شده در محاسبات در نظر گرفته نمی‌شود. براساس مدل جامع اشاره شده، رابطه‌ی ریاضی محاسبه‌ی ردپای آب مصرفی در کارخانه‌ها و صنایع به صورت رابطه‌ی ۱ است:

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

که در آن،  $WCF$ <sup>۱۱</sup> ردپای آب مصرفی،  $DWF$ <sup>۱۲</sup> ردپای آب مستقیم و  $VWF$ <sup>۱۳</sup> ردپای آب مجازی است.<sup>[۱۳]</sup>

مقدار ردپای آب مستقیم برای هر کارخانه و صنعت بسیار متفاوت است و با توجه به فناوری تجهیزات به کار رفته در آن کارخانه می‌تواند تغییر کند. مقدار ردپای

### ۲.۲. آنالیز مرز سیستم

به منظور استفاده و کاربردی کردن مدل ردپای آب در عمل، از یک آنالیز مرز سیستم استفاده می‌شود که محدوده و مرزهای مدل را ارائه می‌دهد. برای این منظور، در ابتدا نگاهی به صنعت سیمان انداخته و سپس آنالیز مرز سیستم انجام شده است. چرخه‌ی عمر صنعت سیمان شامل استخراج مواد خام (سنگ‌آهک و خاک رس)، فرایند تولید سیمان، انتقال، مصرف محصول سیمان و بازیافت محصولات ساخته شده از سیمان است.<sup>[۱]</sup> شکل ۱، مراحل کلی تولید سیمان به روش خشک را نشان می‌دهد. در هر مرحله مقدار قابل توجهی انرژی و آب مصرف می‌شود.<sup>[۱]</sup> محاسبه‌ی ردپای آب برخی از مصالح خام اولیه در چرخه‌ی تأمین بالادست تولید سیمان کار دشواری است و اطلاعات ردپای آب آن‌ها در حال حاضر موجود نیست. علاوه بر این، استخراج و انتقال مصالح خام (ردپای آب حمل‌ونقل مواد اولیه) می‌تواند با توجه به تعداد منابع و فواصل آن‌ها، که اطلاعات آن‌ها به‌خوبی مستند نیست، بسیار متفاوت باشد.<sup>[۱۳]</sup> همچنین مصرف محصولات سیمان و محاسبه‌ی ردپای آب مصرف سیمان به‌طور چشمگیری به مصرف نهایی آن‌ها (برای مثال ساختمان‌ها، مصالح ساختمانی، سدسازی و غیره) وابسته است؛ بنابراین ردپای آب فرایندهای تولید به‌عنوان بدنه‌ی اصلی پژوهش در نظر گرفته شده‌اند.

در آنالیز مرز سیستم، مصرف کلی آب به دو صورت مستقیم و مجازی در نظر گرفته می‌شود و عوامل مصرف آن معرفی می‌شوند. برای ردپای آب، مستقیماً آب مصرف‌شده در خطوط تولید و آب آشامیدنی کارکنان و همچنین آب موردنیاز در بخش‌های خدماتی و فضای سبز کارخانه در نظر گرفته می‌شوند. در بخش ردپای آب مجازی، سه عامل شامل ردپای آب انرژی مصرفی، ردپای آب وعده‌های غذایی،

جدول ۱. مصرف آب در واحدهای تولید سیمان به روش خشک.<sup>[۳]</sup>

ظرفیت تولید (Tonne/۲۴h)	۸۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۳۰۰۰
آب بدون نیاز به جایگزینی	۶۰	۸۰	۱۰۰	۱۶۰
آب خنک‌کن ( $\frac{m^3}{h}$ )				
تبخیر و نشت ( $\frac{m^3}{h}$ )	۶	۸	۱۰	۱۶
آبی که دائم نیاز به جایگزینی دارد	۸	۱۰	۲۰	۲۸
پاشش ( $\frac{m^3}{h}$ )				
مجموع ( $\frac{m^3}{h}$ )	۱۴	۱۸	۳۰	۴۴

جدول ۲. کل مصرف آب که باید از شبکه جایگزین شود.<sup>[۳]</sup>

ظرفیت تولید (Tonne/۲۴h)	۸۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۳۰۰۰
مجموع آب قابل جایگزین ( $\frac{m^3}{h}$ )	۱۴	۱۸	۳۰	۴۴
آب آشامیدنی ( $\frac{m^3}{h}$ )	۵	۵	۵	۵
مجموع آب ورودی از شبکه ( $\frac{m^3}{h}$ )	۱۹	۲۳	۳۵	۴۹
مقدار روزانه آب ورودی ( $\frac{m^3}{۲۴h}$ )	۴۵۶	۵۵۲	۸۴۰	۱۱۷۶

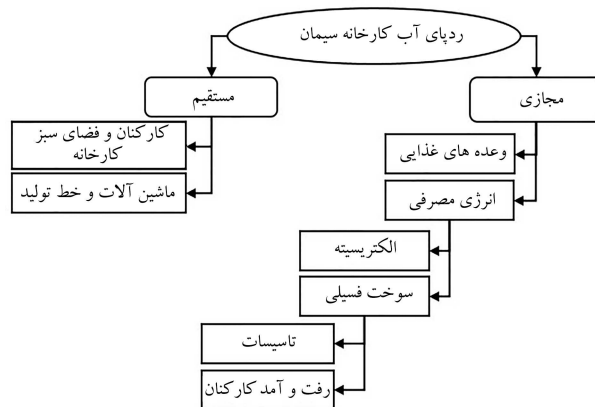
مربوط به سیستم‌های خنک‌کاری است که آب در سیستم بسته‌ی در جریان است و نیاز به جایگزینی ندارد و بخش دیگر مربوط به مصرف آبی است که براساس تبخیر و پاشش، نیاز به جایگزینی مداوم از شبکه‌ی آب دارد.<sup>[۱]</sup> کل آب مصرفی که باید از شبکه برداشت شود، در جدول ۲ گردآوری شده است. جهت آب آشامیدنی کارکنان، دست کم ۵ مترمکعب در ساعت به مقادیر مجموع آب قابل جایگزینی از شبکه اضافه می‌شود.<sup>[۲]</sup> در ردیف آخر جدول ۲، مجموع آب برداشتی از شبکه در ۲۴ ساعت محاسبه می‌شود.

شدت آب<sup>۱۴</sup> مصرفی از نسبت مقدار نهایی آب مصرفی در یک بازه‌ی زمانی مشخص بر مقدار محصول تولیدی در همان بازه‌ی زمانی به دست می‌آید.<sup>[۳۸]</sup> مطابق جدول ۲، شدت مصرف آب مستقیم برای تولید سیمان به روش خشک برای واحدهای با ظرفیت تولید روزانه‌ی ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ تن به ترتیب برابر با ۰٫۵۷، ۰٫۴۲، ۰٫۳۹ و ۰٫۳۹ مترمکعب بر تن است. این مقادیر نشان می‌دهند که با افزایش ظرفیت واحدهای تولیدی شاخص شدت آب کاهش می‌یابد. برای محاسبه‌ی مقدار نهایی ردپای آب مصرف مستقیم باید درصد تلفات آبی تأسیسات را در نظر گرفت و از مقدار آب مصرفی مستقیم کم کرد؛ زیرا آب تلف شده از دسترس خارج می‌شود و مستقیماً در خط تولید به‌کار گرفته نمی‌شود.<sup>[۱۳]</sup>

#### ۲.۳.۲. ردپای آب مجازی (VWF)

در بخش کنونی، راهکار محاسبه‌ی ردپای آب مجازی هر یک از عوامل مصرف و زیربخش‌های آن‌ها به‌صورت مفصل تشریح شده است. اطلاعات به‌کارگرفته شده در مطالعه‌ی حاضر حاصل جمع‌آوری پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه‌ی ردپای آب هستند، اما طبیعی است که با تکمیل مطالعات در زمینه‌ی ردپای آب، زمینه‌ی تکمیل و دقیق‌تر شدن مدل ارائه شده نیز مهیا می‌شود.

ردپای آب سوخت‌های فسیلی: سوخت‌های فسیلی مصرفی در کارخانه‌های مختلف وابسته به قیمت و فراوانی هر یک از آن‌ها در منطقه‌ی است که کارخانه در آن قرار گرفته است. هنوز بررسی کاملی که مقدار ردپای آب هر یک از سوخت‌های فسیلی را برای هر منطقه از دنیا به‌صورت دقیق ارائه کند، انجام نشده است. جدول‌های ۳ و ۴ بخشی از نتایج پژوهش مک اونن و همکاران،<sup>[۳۷]</sup> هستند که براساس آن‌ها مقدار تقریبی ردپای آب هر یک از انواع انرژی و سوخت‌های فسیلی برای مناطق ذکر شده در جدول محاسبه می‌شود. جدول ۳، مقدار تولید سالانه‌ی الکتریسیته و گرما را از هر یک از صورت‌های انرژی در مناطق مختلف



شکل ۳. مدل محاسبه‌ی ردپای آب در کارخانه‌ی سیمان.

آب مجازی انواع انرژی مصرفی در کارخانه براساس منطقه‌ی تولیدکننده‌ی این انرژی می‌تواند تغییر کند که در بخش‌های بعدی به‌صورت مفصل، تأثیر منطقه و نوع انرژی مصرفی بر ردپای آب مجازی بررسی شده است.

#### ۳.۲. ارائه‌ی مدل ردپای آب تولید سیمان

با توجه به مرز سیستم نشان داده شده در شکل ۲، ردپای آب فرایند تولید سیمان در کارخانه‌ی سیمان مورد توجه پژوهش حاضر بوده و بر این اساس مدل ردپای آب در کارخانه سیمان در شکل ۳ ارائه شده است. در مدل ارائه شده، سوخت مصرفی کارخانه‌های سیمان دو نوع مختلف، شامل مازوت و گاز طبیعی در نظر گرفته شده است. بدیهی است که مصرف آب برای هر کارخانه با توجه به نوع سوخت مصرفی، می‌تواند تغییر کند. در ادامه، ردپای آب موارد نشان داده شده در شکل ۳ به تفکیک ارائه شده است.

#### ۱.۳.۲. ردپای آب مصرفی مستقیم (DWF)

مصرف مستقیم آب در هر کارخانه از جمله کارخانه‌ی تولید سیمان بستگی به نوع فرایند، تجهیزات و ظرفیت آن کارخانه دارد. مصرف مستقیم آب در یک کارخانه‌ی سیمان، عمدتاً شامل تولید دوغاب از مواد خام (برای سیستم‌های تر که تقریباً در حال منسوخ شدن است)<sup>[۳]</sup>؛ تجهیزات اصلی مکانیکی جهت خنک کردن ماشین‌آلات؛ آب پاشیده شده در سیستم (برج خنک‌کن، آسیاب‌های مواد و سیمان و غیره)؛ آزمایشگاه و واحدهای اداری / اجتماعی مربوط به کارکنان است.<sup>[۳]</sup>

حجم آب مورد نیاز بسته به شرایط محلی و روش‌های تولید تغییر می‌کند.<sup>[۳]</sup> در جدول ۱، مصرف آب در واحدهای تولید سیمان به روش خشک برای ظرفیت‌های تولید مختلف جهت شرایط اقلیمی اروپا ارائه شده است. در شرایط جوی ایران و با توجه به اقلیم گرم خشک کشور نیاز است که مقادیر ذکر شده مورد بازنگری قرار گیرند.<sup>[۳]</sup> در جدول ۱، دو نوع مصرف آب در نظر گرفته شده است؛ بخشی از آن

جدول ۳. تولید سالانه‌ی الکتریسیته و گرما از منابع مختلف انرژی برای منطقه‌های مختلف دنیا در دوری زمانی ۲۰۰۸ الی ۲۰۱۲ (واحد PJ در سال). [۳۷]

منطقه	زغال سنگ	گاز طبیعی	برق آبی	هسته‌یی	نفت	باد	هیزم	زمین گرمایی	خورشیدی	مجموع
اروپا	۶۶۵۰	۱۰۱۸۰	۲۵۷۹	۴۲۹۴	۸۶۶	۵۶۷	۴۹۳	۱۲۵	۱۱۲	۲۵۸۶۶
چین	۱۴۶۱۲	۲۸۶	۲۵۰۸	۲۸۵	۱۳۵	۱۸۱	۱۰۱	۱۵۲	۰	۱۸۲۵۹
آمریکا و کانادا	۷۲۸۰	۴۲۸۰	۲۳۳۸	۳۳۰۶	۲۰۸	۳۸۰	۱۹۵	۷۴	۷/۵	۱۸۰۶۷
سایر 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	۵۳	۵/۱	۰/۰۹	۲۴۱۲
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 ۴. ردپای آب مصرفی سالانه در تولید الکتریسیته و گرما به تفکیک نوع انرژی و منطقه در دوری زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۲ (۱۰۶ مترمکعب). [۳۷]

منطقه	زغال سنگ	گاز طبیعی	برق آبی	هسته‌یی	نفت	باد	هیزم	زمین گرمایی	خورشیدی	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	۳۲۰۷	۶۲	۳۰	۰/۰۹	۲۸۱۱۴	۰	۰	۳۲۸۸۹
آمریکا و کانادا	۳۹۱۳	۱۱۷۱	۱۴۹۳۶	۲۲۳۹	۱۱۲	۰/۴۸	۲۳۰۹۲	۲۵	۱/۳	۴۵۴۸۹
سایر 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

براساس اطلاعات جدول ۳، مقدار تولید سالانه‌ی گرما توسط گاز طبیعی برای «سایر کشورهای آسیایی» برابر ۵۹۶۵ پتا ژول (PJ) (معادل ۵۹۶۵۰۰۰ تا ژول (TJ)) است. با استفاده از مقدار HHV که برای گاز طبیعی برابر ۰/۰۰۰۰۳۴ مترمکعب  $\left(\frac{TJ}{m^3}\right)$  است، [۳۷] مقدار تولید گاز طبیعی بعد از تقسیم تراژول بر مترمکعب (۱۷۵/۴۴۱ گیگا مترمکعب  $Gm^3$ ) در سال ۵۹۶۵۰۰۰ بر ۰/۰۰۰۰۳۴ برابر ۱۷۵/۴۴۱ گیگا مترمکعب در سال محاسبه می‌شود. براساس جدول ۴، مقدار ردپای آب تولید گاز طبیعی برای همین منطقه‌ی جغرافیایی برابر ۱۶۲۳ میلیون مترمکعب در سال است؛ بنابراین شدت آب مصرفی برای تولید گاز طبیعی برابر ۹/۲۵۱ لیتر آب بر هر مترمکعب گاز طبیعی محاسبه شده است.

— نفت کوره (مازوت): مطابق با نتایج مرجع [۳۸]، در شکل ۴ مقدار محصولات حاصل از پالایش یک بشکه‌ی نفت خام ارائه شده است. مطابق با شکل مذکور، از پالایش هر بشکه‌ی نفت خام (۱۵۹ لیتر)، ۳/۸ لیتر نفت کوره یا مازوت به دست می‌آید؛ بنابراین هر لیتر مازوت از پالایش ۴۱/۸۴ لیتر (۰/۲۶۳۱ بشکه) نفت خام حاصل می‌شود. میزان مصرف آب برای استخراج هر بشکه نفت خام، ۸۵/۵ لیتر است و برای پالایش هر بشکه نفت خام و حصول فرآورده‌های مختلف حدود ۳۱/۳۵ تا ۱۴۸/۲۰ لیتر آب مصرف می‌شود. [۳۸] براساس این اطلاعات می‌توان نتیجه گرفت که برای استخراج ۴۱/۸۴ لیتر نفت خام (معادل یک لیتر مازوت پالایش شده)، ۲۲/۵ لیتر آب و برای پالایش همین مقدار نفت خام، بین ۸/۲۵ تا ۴۰ لیتر آب مصرف می‌شود؛ بنابراین مجموع ردپای آب استخراج و

جغرافیایی دنیا براساس واحد پتا ژول (PJ) بیان می‌کند. ژول، واحد استاندارد جهانی برای انرژی است، [۳۸] و برای تبدیل مقادیر جدول ۳ به مقادیری با واحدهای مرسوم (مانند مترمکعب برای گاز طبیعی) از مفهوم مقدار حرارت بیشتر تولید شده برای واحد سوخت (HHV) استفاده می‌شود و مقادیر موردنظر هر نوع انرژی بر مقدار عددی HHV آن نوع انرژی تقسیم می‌شود. [۳۷] جدول ۴، مقدار ردپای آب سالانه برای هر یک از گونه‌های انرژی ذکر شده در مناطق مورد نظر را براساس واحد میلیون مترمکعب در سال ارائه می‌دهد. قابل ذکر است که در مورد صنعت سیمان در ایران لازم است که پرکاربردترین سوخت‌های مصرفی، شامل گاز طبیعی و نفت کوره (مازوت) هستند. [۱] بر همین اساس ردپای آب گاز طبیعی و مازوت در بخش حاضر محاسبه شده است.

— گاز طبیعی: کشور ایران با داشتن ۱۶٪ از ذخایر گازی دنیا، به‌عنوان یکی از سه کشور دارنده‌ی بیشترین ذخایر گاز در جهان مطرح است و از حیث رتبه، رتبه‌ی دوم را در اختیار دارد. [۴۰] بر همین اساس سوخت فسیلی بیشتر صنایع ایران از نوع گاز طبیعی است. ردپای آب مصرفی در تولید گاز طبیعی در مراحل حفر چاه‌های دسترسی (در ترکیب بتونیت) و فرآوری گاز در پالایشگاه‌ها (مورد نیاز برای خنک‌کاری برج‌های تقطیر و کمپرسورها) محاسبه می‌شود. [۳۸] برای محاسبه‌ی ردپای آب بخش کنونی از اطلاعات، جدول‌های ۳ و ۴ استفاده می‌شود و اطلاعات مربوط به تولید گرما و ردپای آب گاز طبیعی در ایران در بخش «سایر کشورهای آسیایی» قرار می‌گیرد. [۳۷]

جدول ۵. اطلاعات مربوط به اجزاء تشکیل دهنده‌ی هر وعده‌ی غذایی [۴۴-۴۲،۲۶]

اجزاء	$F_i\%$	$C_i$ (toman/kg)	$WF_i$ (litres/kg)
گوشت گاو	۲۵	۳۰۰۰۰	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 ۶. شدت مصرف آب پارامترهای ردپای آب مجازی.

گاز طبیعی (لیتر بر متر مکعب)	۹,۲۵۱
نفت کوره (لیتر بر لیتر)	۳۰,۷۵-۶۲,۵۰
بنزین حمل‌ونقل (لیتر بر کیلومتر)	۰,۱۶-۰,۳۳
گازوئیل حمل‌ونقل (لیتر بر کیلومتر)	۰,۱۸-۰,۲۶
الکتریسیته (لیتر بر مگاوات ساعت)	۱۸۰۰
هر وعده‌ی غذایی (لیتر بر هر وعده‌ی غذایی)	۴۷۵۶,۸۸

مورد بررسی است. برای محاسبه‌ی  $WF_{meal}$  از رابطه‌ی ۳ استفاده می‌شود:

$$WF_{meal} = C_m \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{100} \times \frac{1}{C_i} \times WF_i \quad (3)$$

که در آن،  $C_m$  بیانگر قیمت تمام شده‌ی هر وعده‌ی غذایی است، که در مثال ذکر شده با توجه به قیمت‌های روز بازار اغذیه، ۱۰۰۰۰ تومان برای هر وعده در نظر گرفته می‌شود؛  $F_i$  درصد هزینه‌ی هر یک از اجزاء تشکیل دهنده‌ی یک وعده‌ی غذایی از قیمت نهایی یک وعده‌ی غذایی است؛  $C_i$  قیمت روز هر واحد وزنی از اجزاء تشکیل دهنده‌ی وعده‌ی غذایی است، که براساس اطلاعات روزانه قابل تغییر است و  $WF_i$  ردپای آب هر یک از اجزاء تشکیل دهنده‌ی وعده‌ی غذایی بر حسب لیتر بر کیلوگرم است. [۴۴] در جدول ۵، اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه‌ی ردپای آب هر وعده‌ی غذایی ارائه شده است.

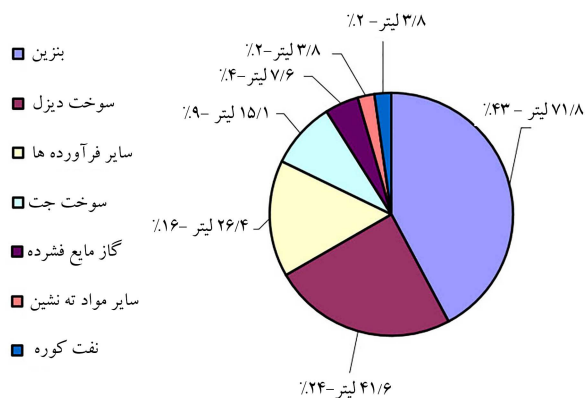
براساس رابطه‌ی ۳ و جدول ۵، ردپای آب هر وعده‌ی غذایی معمول ( $WF_{meal}$ ) برابر ۴۷۵۶,۸۸ لیتر محاسبه شده است.

### ۳.۳.۲. نتایج ارزیابی پارامترهای ردپای آب مجازی

در جدول ۶، خلاصه‌ی نتایج بخش‌های پیشین برای استفاده در محاسبات ردپای آب مجازی کارخانه‌ها ارائه شده است.

### ۳. مطالعه‌ی موردی

در بخش حاضر، کاربرد مدل ارائه شده در یک کارخانه‌ی تولید سیمان در غرب ایران (بنا بر سیاست‌های کارخانه از ذکر نام کارخانه‌ی مذکور پرهیز شده است) بررسی شده است. فاصله‌ی آن تا نزدیک‌ترین شهر، ۱۵ کیلومتر؛ ظرفیت تولید سالانه‌ی آن، ۱,۷ میلیون تن سیمان و مصرف سالانه‌ی آب آن، ۳۰۰ هزار مترمکعب بوده است.



شکل ۴. فرآورده‌های حاصل از پالایش یک بشکه (۱۵۹ لیتر) نفت خام به همراه درصد و حجم (لیتر) هر فرآورده. [۳۸]

پالایش هر لیتر سوخت مازوت برابر ۷۵/۳ تا ۶۲/۵ لیتر محاسبه شده است. -- سوخت‌های مورد نیاز حمل‌ونقل: کینگ و وبر (۲۰۰۸)، طی پژوهشی به بررسی شدت آب مورد نیاز برای تولید و مصرف سوخت ناوگان حمل و نقل آمریکا پرداخته‌اند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که ردپای آب مصرف سوخت خودروهای بر پایه‌ی سوخت بنزین به صورت میانگین برابر ۱۶/۰ تا ۳۳/۰ و خودروهای بر پایه‌ی سوخت دیزل حدود ۱۸/۰ تا ۲۶/۰ لیتر به ازاء هر کیلومتر مسافت طی شده است.

-- ردپای آب الکتریسیته: مک اونن و همکاران (۲۰۱۵)، [۳۷] طی پژوهشی به بررسی ردپای آب مورد نیاز برای تولید الکتریسیته در نقاط مختلف جهان پرداخته‌اند. براساس نتایج پژوهش آن‌ها، مقدار ردپای 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. براساس پژوهش اخیر، [۳۷] تولید الکتریسیته در ایران در محدوده‌ی کم مصرف آب قرار دارد و ردپای تولید هر تراژول الکتریسیته در محدوده‌ی صفر تا ۵۰۰ مترمکعب (صفر تا ۱/۸ مترمکعب بر مگاوات ساعت) قرار دارد.

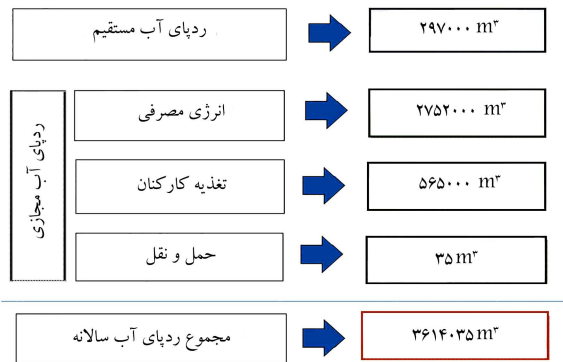
-- ردپای آب وعده‌های غذایی: پژوهش‌های پیشین در زمینه‌ی ردپای آب مواد غذایی، [۳۲] بیشتر به محاسبه‌ی ردپای آب مواد و محصولات کشاورزی مختلف پرداخته‌اند و ردپای آب یک وعده‌ی غذایی که متشکل از چند محصول و ماده‌ی غذایی است، کاملاً محاسبه نشده است. در پژوهش حاضر، برای نخستین بار یک الگوی ابتکاری برای محاسبه‌ی ردپای آب فرآوری و تهیه‌ی هر وعده‌ی غذایی ارائه و نحوه‌ی ارتباط دادن ردپای آب وعده‌های غذایی با ساعات حضور کارکنان در کارخانه‌ها به صورت روابط ریاضی بیان شده است. برای محاسبه‌ی ردپای آب تغذیه‌ی کارکنان کارخانه‌ها در طول یک دوره‌ی زمانی مشخص، رابطه‌ی ۲ پیشنهاد شده است:

$$WF_{FOOD} = \frac{WF_{meal}}{h_m} \times N_h \quad (2)$$

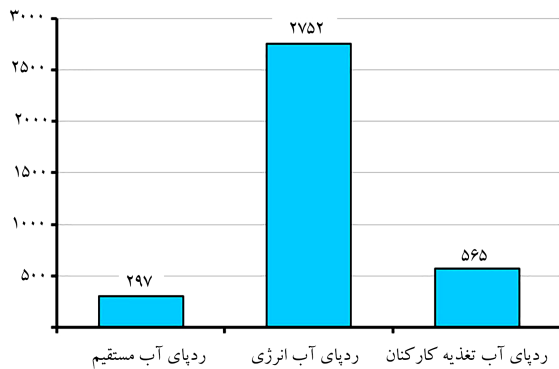
که در آن،  $WF_{FOOD}$  ردپای آب کلی تغذیه‌ی کارکنان (برحسب لیتر یا مترمکعب) در واحد زمان؛  $WF_{meal}$  ردپای آب هر وعده‌ی غذایی کارگاهی بر حسب لیتر بر هر وعده‌ی غذایی؛  $h_m$  ساعت کاری مفید هر یک از کارکنان (برای مثال در یک نوبت کاری) که در آن یک وعده‌ی غذایی در کارگاه یا کارخانه مصرف می‌شود و  $N_h$  تعداد کل ساعت کاری کارگاه (در واحد زمان، برای مثال سال) یا کارخانه‌ی

جدول ۷. مصرف سالانه‌ی انرژی و ردپای آب انرژی کارخانه‌ی سیمان.

نوع انرژی	مصرف انرژی کارخانه	ردپای آب انرژی	
		محدوده‌ی تولید	میانگین ( $m^3$ )
گاز طبیعی	$157000000 m^3$	$0/00925 (m^3/m^3)$	۱۴۵۲۰۰۰
نفت کوره	$21000 m^3$	$30/75 - 62/5 (m^3/m^3)$	۹۸۰۰۰۰
الکتریسیته	$180000 Mwh$	$1/8 (m^3/Mwh)$	۳۲۰۰۰۰
مجموع	-	-	۲۷۵۲۰۰۰



شکل ۵. ردپای آب مستقیم و مجازی بخش‌های مختلف کارخانه در دوره‌ی یک سال تولید.



شکل ۶. ردپای آب پارامترهای مختلف کارخانه ( $m^3$ ) ۱۰۰۰.

مترمکعب برآورد شده‌اند، بیش از ۱۱ برابر ردپای آب مستقیم کارخانه و حدود ۹۰٪ از ردپای آب کلی کارخانه را تشکیل می‌دهند. این اطلاعات نشان می‌دهد که بخش اصلی مصرف آب کارخانه مربوط به مصارف مجازی است و این در حالی است که ردپای مجازی آب، موضوعی ناشناخته برای این صنعت و سایر صنایع تولیدی به شمار می‌رود.

شکل‌های ۵ و ۶ نشان می‌دهند که بیشترین ردپای آب مربوط به ردپای آب مجازی انرژی است، که به‌تنهایی حدود ۹۷۳ برابر ردپای آب مصرفی مستقیم در کارخانه است؛ لذا توجه به بهینه‌سازی مصرف انرژی نه فقط به کاهش ردپای کربن و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی منجر می‌شود، بلکه استفاده‌ی بهینه از منابع انرژی در واقع ارتباط مستقیمی با کاهش ردپای آب خواهد داشت. اهمیت توجه به این موضوع زمانی مشخص می‌شود که این دیدگاه در خصوص بهینه‌سازی مصرف انرژی و ارتباط آن با ردپای آب، جایگاهی در پژوهش‌های پیشین نداشته است. لازم به ذکر است که ردپای آب تغذیه‌ی کارکنان، بیان‌کننده‌ی ارتباط مصرف

درصد تلفات آبی با توجه به نظر کارشناسان کارخانه‌ی مذکور، ۱٪ است. با توجه به اطلاعات ارائه شده، مقدار ردپای آب مستقیم بعد از کم کردن ۱٪ ذکر شده (به دلیل اینکه وارد چرخه‌ی تولید نمی‌شود) برابر ۲۹۷ هزار مترمکعب محاسبه شده است. مقدار پساب خروجی تأسیسات ناچیز است و پس از عبور از تصفیه‌خانه‌ی کارخانه، صرف آبیاری فضای سبز می‌شود. در جدول ۷، مصرف سالانه‌ی انواع انرژی در کارخانه و ردپای آب مرتبط با آن شرح داده شده است. اطلاعات مربوط به محدوده‌ی ردپای آب تولید انرژی از جدول ۶ استخراج شده است. جدول ۷ نشان می‌دهد که ردپای آب مجازی مربوط به انرژی مصرفی در تأسیسات کارخانه در مجموع  $2752000 + 565000 + 35 = 3614350 m^3$  خواهد بود.

برای محاسبه‌ی ردپای آب سوخت مصرفی در بخش رفت‌وآمد کارکنان به کارخانه لازم است ذکر شود که تعداد کارکنان کارخانه‌ی مذکور، ۴۳۰ نفر هستند. بنابر مطالعات میدانی، بیشتر کارکنان از ساکنان نزدیک‌ترین شهر به کارخانه هستند و برای رفت و آمد آن‌ها، سرویس‌هایی با ظرفیت ۲۰ نفر در نظر گرفته شده است که سوخت مصرفی سرویس‌ها، گازوئیل است. ۸۰٪ کارکنان از سرویس‌ها و مابقی از خودروهای شخصی استفاده می‌کنند. روزانه ۱۸ سرویس، وظیفه‌ی رساندن و بازگرداندن کارکنان به کارخانه را بر عهده‌دارند. براساس اطلاعات ارائه شده، مجموع مسافت طی شده توسط تمامی سرویس‌ها، سالانه برابر ۱۶۰ هزار کیلومتر محاسبه شده است. براساس اطلاعات جدول ۶، با در نظر گرفتن مقدار  $0/22$  لیتر آب (میانگین  $0/18$  تا  $0/26$ ) به‌عنوان ردپای آب مصرف سوخت خودروهای دیزلی در هر کیلومتر مسافت طی شده، ردپای آب حمل‌ونقل کارکنان در یک سال، تقریباً ۳۵ مترمکعب محاسبه شده است.

محاسبه‌ی ردپای آب مجازی وعده‌های غذایی مصرفی توسط کارکنان با فرض ۸ ساعت کار برای هر روز کارکنان و مصرف یک وعده‌ی غذایی در ۸ ساعت کاری محاسبه شده است. طبق اطلاعات دریافتی از کارخانه، مجموع ساعات کار کل کارکنان در یک سال برابر ۹۵۰ هزار ساعت است. ردپای کلی وعده‌های غذایی برای کارخانه مطابق با رابطه‌ی ۲ و جدول ۶، برابر ۵۶۵ هزار مترمکعب محاسبه شده است.

#### ۴. تفسیر نتایج

ردپای آب کلی کارخانه‌ی مورد مطالعه با ظرفیت تولید سیمان فعلی، سالانه  $3614350$  مترمکعب محاسبه شده است. شکل‌های ۵ و ۶، ردپای آب مصرفی مستقیم و مجازی کارخانه را به‌صورت تفکیکی نشان می‌دهند. این حجم قابل توجه از ردپای آب، در واقع بیانگر برداشت حجم عظیمی از منابع آب است. تصور عمومی در مورد مصرف آب متوجه برداشت و مصرف مستقیم از منابع آبی است؛ در حالی که ردپای آب مجازی، نکته‌ی کلیدی و بخش گمشده‌ی مصرف و صرفه‌جویی در مصرف آب است. مجموع ردپاهای آب مجازی در کارخانه‌ی مذکور که  $3614350 + 297000 = 3911350 m^3$

جدول ۸. میانگین جهانی ردپای الکتریسیته و گرمای تولیدی برحسب واحد مترمکعب بر ترا ژول (۲۰۰۸-۲۰۱۲). [۳۷]

نوع انرژی	باد	خورشید	گاز طبیعی	زمین گرمایی	زغال سنگ	نفت	هسته‌ای	برق‌آبی	هیزم	میانگین کل
میانگین ردپای آب	۱٫۳	۱۴۰	۲۴۷	۳۴۲	۴۹۵	۳۴۲	۶۷۸	۱۵۱۰۰	۱۵۶۴۰۰	۴۲۴۱

مقدار ردپای آب فراوری گاز طبیعی نیز در مقایسه با فراوری محصولات نفت خام از جمله نفت کوره بسیار کمتر است. اگرچه فراوری نفت خام، فراورده‌های جانبی متعددی دارد و فقط با هدف استحصال نفت کوره انجام نمی‌شود، ولی به‌کارگیری فراورده‌ی نفت خام در صنایع مختلف مستقیماً با آب مصرفی برای استخراج و فراوری نفت خام ارتباط پیدا می‌کند. بنابراین پیشنهاد می‌شود که کارخانه‌ها و صنایع به جای استفاده از نفت خام و سایر فراورده‌های نفتی که ردپای آب زیادی دارند، از گاز طبیعی به‌عنوان یک سوخت با کمینه‌ی ردپای کربن و آب استفاده کنند.

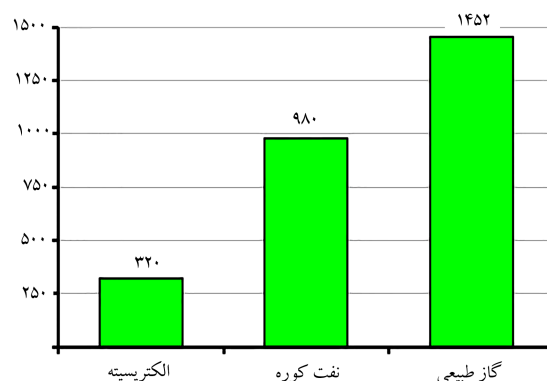
ردپای آب الکتریسیته که به‌تنهایی تقریباً برابر ردپای آب مستقیم کارخانه است، با استفاده از منابع تجدیدپذیر در تولید الکتریسیته به میزان کمینه خواهد رسید. براساس نتایج مرجع، [۳۷] بهترین نوع انرژی مصرفی برای کارخانه‌ها از نظر ردپای آب کمتر، الکتریسیته ایجاد شده توسط توربین‌های بادی است. براساس جدول ۸، مقدار میانگین جهانی ردپای آب تولید الکتریسیته از نیروی باد برابر ۱٫۳ مترمکعب بر ترا ژول (۴٫۶۸ لیتر بر مگاوات) است، اما باید توجه داشت در همه‌ی 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 براساس جدول ۸ ردپای آب تولید الکتریسیته به‌وسیله‌ی نیروی خورشید برابر ۱۴۰ مترمکعب بر ترا ژول (۵۰۰ لیتر بر مگاوات) است.

براساس نتایج مک اونن و همکاران (۲۰۱۵)، [۳۷] از میان سوخت‌های فسیلی، گاز طبیعی کمترین مقدار ردپای آب را دارد. همان‌طور که پیش‌تر نیز ذکر شد، با توجه به فراوانی گاز طبیعی در ایران به نظر می‌رسد در حال حاضر گاز طبیعی، مناسب‌ترین سوخت برای تأمین انرژی صنایع از لحاظ ردپای آب است، اما باید مسائل مربوط به ردپای کربن در استفاده از سوخت‌های فسیلی نیز در نظر گرفته شود. بر همین اساس، اهمیت تولید الکتریسیته از منابع تجدیدپذیر دو چندان خواهد شد، زیرا علاوه بر کاهش چشمگیر ردپای کربن، ردپای آب نیز به میزان مناسبی کاهش خواهد یافت.

صنایع بزرگ تولیدکننده باید با به‌روزرسانی مداوم تجهیزات، راندمان کارخانه را بالا ببرند و مقدار مصرف انرژی را به میزان کمینه برسانند. علاوه بر این، صنایع می‌توانند به اقتضای شرایط محیطی منطقه با استفاده از تجهیزات اختصاصی تولید الکتریسیته از منابع تجدیدپذیر، تمام و یا قسمتی از نیروی الکتریسیته‌ی موردنیاز خود را تأمین کنند.

## ۵. آنالیز حساسیت

جهت بررسی حساسیت مدل ردپای آب پیشنهادی به عوامل مصرف آب در نظر گرفته‌شده در محدوده‌ی مرز سیستم، یک آنالیز حساسیت انجام شده است. براساس شکل ۳، پارامترهای تأثیرگذار در ردپای آب کلی کارخانه‌ی سیمان مورد مطالعه، شامل ۶ پارامتر: گاز طبیعی، نفت کوره، تغذیه، الکتریسیته، مصرف مستقیم و سوخت‌های موردنیاز حمل و نقل هستند؛ بنابراین نیاز است تا حساسیت مقدار ردپای آب کلی کارخانه‌ی سیمان نسبت به پارامترهای مذکور مشخص شود. لذا، از روش آنالیز

شکل ۷. ردپای آب گونه‌های انرژی مصرفی در کارخانه (۱۰۰۰ m<sup>۳</sup>).

مجازی آب با به‌کارگیری نیروی انسانی در صنایع است. وجود بیش از ۰٫۵ میلیون مترمکعب ردپای آب در بخش مذکور با سهم ۱۵٪ از ردپای آب کلی و ۱۷٪ از ردپای آب مجازی، تأثیر قابل‌تأملی در بالا بردن ردپای 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 ردپای آب ارتباط پیدا می‌کند، استفاده از نیروی انسانی نیز از طریق تغذیه و آب آشامیدنی مصرفی کارکنان در طی ساعات حضور در کارخانه به ردپای آب مجازی مرتبط می‌شود. در واقع با کاهش تعداد نیروی انسانی از طریق به‌روزرسانی تجهیزات کارخانه و خودکارسازی مراحل تولید، می‌توان ردپای آب مجازی مربوط به نیروی انسانی را به کمترین میزان رساند؛ هر چند این امر ممکن است به افزایش ردپای آب مجازی انرژی در نتیجه‌ی استفاده از ماشین به جای نیروی انسانی منجر شود و بررسی این تأثیر می‌تواند موضوع مطالعات آینده باشد. مقدار ردپای آب مربوط به بخش حمل‌ونقل کارکنان در مقایسه با سایر ردپاهای آب بسیار ناچیز و قابل‌صرف‌نظر کردن است. البته همان‌طور که ذکر شد، تأمین مواد و مصالح اولیه در چرخه‌ی تأمین و بارگیری و ارسال آن‌ها در مرز سیستم (محدوده‌ی مطالعه‌ی حاضر) قرار نگرفتند. در صورتی که در بخش حاضر، حمل و نقل در محاسبات ردپای آب لحاظ شود، می‌توان در مورد بهینه‌سازی مصرف سوخت نیز برای کاهش ردپای آب آن بخش اظهار نظر کرد. شکل ۷، ردپای آب مجازی هر یک از انرژی‌های مصرفی در کارخانه را به‌صورت تفکیکی نمایش می‌دهد. الکتریسیته، نفت کوره و گاز طبیعی به‌عنوان سه نوع از انرژی‌های مصرفی در کارخانه‌ی مورد مطالعه هر یک به ترتیب ۱۰٪، ۳۰٪ و ۴۳٪ از ردپای آب مجازی کارخانه را تشکیل می‌دهند.

مصرف سوخت موردنیاز در کوره‌های کارخانه‌ی مورد مطالعه و بیشتر کارخانه‌های تولید سیمان ایران از دو نوع گاز طبیعی و نفت کوره است. سوخت مصرفی اصلی کارخانه‌ی مذکور از نوع گاز طبیعی است و از نفت کوره نیز به‌عنوان یک سوخت مکمل برای جبران کمیبود گاز استفاده می‌شود. براساس اطلاعات جدول‌های ۳ و ۴، ردپای آب تولید نفت خام، زغال‌سنگ، و گاز طبیعی به‌عنوان سه منبع اصلی سوخت فسیلی به ترتیب برابر ۴۹۷، ۴۹۵ و ۲۴۱ مترمکعب بر ترا ژول انرژی حرارتی محاسبه می‌شود. همان‌طور که مشخص است، گاز طبیعی در مقایسه با سایر سوخت‌های فسیلی، ردپای آب تولید کمتری دارد.



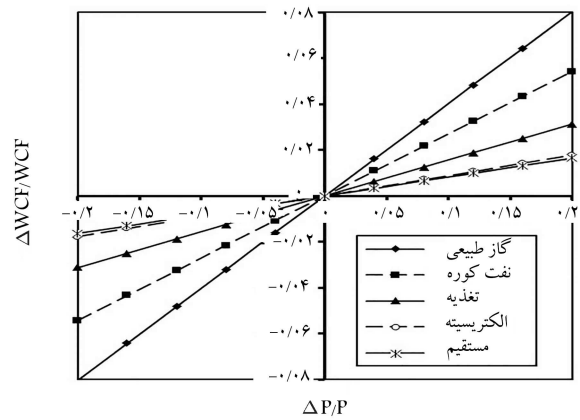
## ۷. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با توجه به بحران آبی موجود در ایران، اهمیت ارائه راهکارهایی برای کاهش مصرف آب روز به روز بیشتر می‌شود. کارخانه‌ها و صنایع گوناگون، یکی از عمده‌ترین مراکز مصرف انرژی و آب در جهان هستند. موضوع مصرف انرژی و ارتباط آن با ردپای آب از موضوعاتی است که تاکنون کمتر به آن‌ها توجه شده است. همان‌طور که اشاره شد، مقدار ردپای آب کمتر نه فقط نشان‌دهنده صرفه‌جویی در منابع آبی است، بلکه نمایانگر استفاده بهینه از منابع انرژی و انتخاب منبع مناسب انرژی مصرفی است. پژوهش حاضر علاوه بر آشکار کردن جنبه‌های پنهان ارتباط بین ردپای آب و انرژی مصرفی، مدلی را برای محاسبه‌ی ردپای آب مجازی صورت‌های مختلف انرژی، حمل و نقل، و اثر انسانی در صنعت سیمان ارائه کرده است، که برای تمامی کارخانه‌های تولید سیمان با هرگونه سوخت مصرفی قابل استفاده است و با ایجاد تغییراتی اندک برای هر کارخانه‌ی قابل کاربرد است. استفاده از مدل ارائه شده برای کارخانه‌های مختلف سیمان، امکان به وجود آوردن یک سیستم مقایسه‌ی براساس معیار ردپای آب فراهم می‌آورد. مدل ردپای آب می‌تواند ریسک آب کارخانه‌های سیمان را نشان دهد. همچنین این مدل می‌تواند به سیاست‌گذاران این امکان را بدهد که ابزار مناسبی برای تشویق کارخانه‌های سیمان با ردپای آب کمتر و یا حتی جریمه کردن و اخذ عوارض از کارخانه‌های با ردپای آب بحرانی در اختیار داشته باشند.

یکی از راهکارهای پیش روی کارخانه‌ی مورد مطالعه برای کاهش ردپای آب مجازی، که مقدار ردپای آب آن را به مقدار قابل‌توجهی کاهش می‌دهد، کمینه‌سازی استفاده از نفت کوره به‌عنوان سوخت و جایگزین کردن آن با سوخت‌های پاک‌تر و با ردپای آب مجازی کمتر است. به‌روزرسانی تجهیزات و ماشین‌آلات کارخانه منجر به کاهش مقدار مصرف حامل‌های انرژی می‌شود و کاهش ردپای آب مستقیم و مجازی کارخانه را در پی خواهد داشت. استفاده‌ی بهینه از نیروی انسانی از طریق کمینه‌سازی کارکنان در بخش‌های غیرضروری و همچنین خودکارسازی کارخانه می‌تواند نقش مستقیمی در کاهش ردپای آب کارخانه‌ی مذکور داشته باشد.

نوشتار حاضر، برای اولین بار به موضوع ردپای آب در صنعت سیمان پرداخته و مدل محاسباتی برای آن ارائه کرده است. موضوع ردپای آب مجازی در نوشتارهای مرتبط با این صنعت کمتر به چشم می‌خورد و بیشتر نگاه‌ها به سوی آب مصرفی مستقیم است؛ این در حالی است که نوشتار حاضر نشان داد که ردپای آب مجازی نسبت به ردپای مستقیم قابل توجه است. راهکارهای ارائه شده برای کارخانه‌ی سیمان مورد مطالعه در مقیاس کلی برای سایر کارخانه‌های سیمان و حتی سایر صنایع تولیدی قابل کاربرد است. همچنین می‌توان اضافه کرد که مناطق صنعتی می‌توانند با تولید الکتروسیسته از منابع تجدیدپذیر، انرژی پاک موردنیاز صنایع را با کمینه‌ی ردپای آب و کربن فراهم آورند. امید است نوشتار حاضر بتواند دانش مصرف آب را در صنایع به‌خصوص صنعت سیمان افزایش دهد و نگاه جدیدی را پیش روی متصدیان صنایع در زمینه‌ی مصرف آب باز کند.

راه حل‌های ارائه شده در پژوهش حاضر جهت کاهش رد پای آب تولید سیمان از نگاه محیط زیستی و حفظ منابع آبی کشور است. بررسی اقتصادی و امکان‌سنجی چنین راه‌حلی می‌تواند گامی مهم در استفاده‌ی عملی راه‌حل‌های ارائه شده باشد. ظرفیت تولید سیمان به‌عنوان یک پارامتر جداگانه در مدل ردپای آب تعریف نشده است؛ لذا آثار ظرفیت تولید سیمان در حساسیت مدل می‌تواند موضوع مطالعات آینده باشد.



شکل ۸. آنالیز حساسیت برای نمایش تأثیر پارامترها در ردپای آب کلی.

حساسیت پارامتری استفاده شده است. به علت کوچک بودن مقدار پارامتر ردپای آب سوخت‌های مورد نیاز حمل و نقل، از انجام آنالیز حساسیت برای پارامتر مذکور صرف‌نظر شده است.

در شکل ۸، نتایج آنالیز حساسیت پارامترهای مختلف تأثیرگذار در ردپای آب کارخانه سیمان ارائه شده است؛ که در آن، اعداد محور عمودی، بیانگر گرادیان ردپای آب کلی کارخانه  $(\frac{\Delta WFC}{WFC})$  و اعداد محور افقی، بیانگر گرادیان ردپای آب هر یک از پارامترها  $(\frac{\Delta P}{P})$  هستند. همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد، با افزایش مقدار هر یک از پارامترها، ردپای آب کلی افزایش یافته است. با افزایش (کاهش) ۱۰ درصدی هر یک از پارامترهای ردپای آب گاز طبیعی، نفت کوره، تغذیه، الکتروسیسته، و مصرف مستقیم به ترتیب افزایش (کاهش) ۴، ۲٫۷۲، ۱٫۵۶، ۰٫۸۸ و ۰٫۸۲ درصدی ردپای آب کلی مشاهده می‌شود. مقادیر مذکور نشان می‌دهند که گاز طبیعی، نفت کوره، و تغذیه تأثیر بیشتری در تغییرات ردپای آب کارخانه دارند.

## ۶. بررسی اعتبار مدل

در کارخانه‌ی مورد مطالعه، شدت مصرف آب مستقیم برای تولید هر تن سیمان حدود ۰٫۲ مترمکعب است. استفاده از مدل ردپای آب ارائه شده در پژوهش حاضر نشان داد که با به‌کارگیری مفهوم ردپای آب، شدت مصرف آب برای تولید هر تن سیمان در کارخانه‌ی مورد مطالعه برابر ۲٫۱۲۶ مترمکعب بوده است، که بیش از ۱۰ برابر شدت مصرف آب مستقیم کارخانه‌ی مذکور است.

در زمینه‌ی ردپای آب تولید سیمان، پژوهش مشابهی انجام نشده است، تا نتایج آن با مقادیر به‌دست آمده در پژوهش حاضر مقایسه شود، اما از نتایج پژوهش یوفان ژو و همکاران،<sup>[۱۳]</sup> می‌توان برای بررسی صحت نتایج حاصل‌شده در پژوهش حاضر استفاده کرد. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، یوفان ژو و همکاران، به بررسی ردپای آب در صنعت فولاد پرداخته‌اند و نتایج آن‌ها نشان داده است که بدون به‌کارگیری مفهوم آب مجازی، شدت مصرف آب برای تولید هر تن فولاد برابر ۰٫۴۳۵ مترمکعب است. در حالی که با استفاده از مفهوم ردپای آب و آب مجازی، این مقدار برابر ۵٫۴۷۱ مترمکعب به‌دست آمده است، که حدود ۱۲٫۵ برابر بیشتر از شدت آب مستقیم است. این اطلاعات با نتایج پژوهش حاضر، که شدت مصرف آب با به‌کارگیری مفهوم ردپای آب را بیش از ۱۰ برابر شدت مصرف آب مستقیم بیان کرده است، مطابقت دارد.

## پانوشتها

1. gross domestic product (GDP)
2. Valderrama
3. Chen et al
4. portland cement association
5. virtual water
6. Hoekstra
7. water footprint
8. ecological footprint
9. The chain-summation approach
10. The stepwise accumulative approach
11. water consumption footprint
12. direct water footprint
13. virtual water footprint
14. water intensity
15. higher heating value

## (References) منابع

1. Bod, E.M. "An analysis of cement industry", *Cement Technology*, **73**, pp. 120 (In Persian) (2014).
2. Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M. and et al. "Sustainable cement production-present and future", *Cement and Concrete Research*, **41**(7), pp. 642-650 (2011).
3. Chehreghani, H., *Environment in Cement Industry*, Hazegh Publications, (In Persian) (2004).
4. 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. Prod.*, **25**, pp. 60-67 (2012).
5. Chen, C., Habert, G., Bouzidi, Y. and et al. "Environmental impact of cement production: Detail of the different processes and cement plant variability evaluation", *J. Clean. Prod.*, **18**, pp. 478-485 (2010).
6. Cemex 2015, "2014 Sustainable development report", Building Resilient and Sustainable Urban Communities.
7. Holcim 2015, "Corporate sustainable development report 2014", Building on Ambition.
8. Lafarage 2014, Sustainability Report Lafarge 2013.
9. Marceau, M.L., Nisbet, M.A. and VanGeem, M.G. "Life cycle inventory of Portland Cement Manufacture", Portland Cement Association, Skokie, IL (2006).
10. Allan, J. "Virtual water: A strategic resource. global solutions to regional deficits", *Groundwater*, **36**, pp. 545-546 (1998).
11. Verma, S., Kampman, D.A., Van Der Zaag, P. and et al. "Going against the flow: A critical analysis of inter-state virtual water trade in the context of India's National River Linking Program", *Physics and chemistry of the earth, Parts A/B/C*, **34**(4), pp. 261-269 (2009).
12. 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 (2011).
13. 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*, **92**, pp. 274-281 (2015).
14. Aldaya, M.M., Chapagain, A.K., Hoekstra, A.Y. and et al. "The water footprint assessment manual: Setting the global standard", Routledge (2012).
15. Hoekstra, A.Y. and Mekonnen, M.M. "The water footprint of humanity", *Proceedings of The National Academy of Sciences*, **109**, pp. 3232-3237 (2012).
16. Zhuo, L., Mekonnen, M.M. and Hoekstra, A.Y. "Benchmark levels for the consumptive water footprint of crop production for different environmental conditions: a case study for winter wheat in China", *Hydrology and Earth System Sciences*, **20**, pp. 45-47 (2016).
17. Mekonnen, M.M. and Hoekstra, A.Y. "Water footprint benchmarks for crop production: A first global assessment", *Ecological Indicators*, **46**, pp. 214-223 (2014).
18. 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*, **94**, pp. 73-85 (2016).
19. Erclin, A.E. and Hoekstra, A.Y. "Water footprint scenarios for 2050: A global analysis", *Environment International*, **64**, pp. 71-82 (2014).
20. Chiu, Y.W. and Wu, M. "Assessing county-level water footprints of different cellulosic-biofuel feedstock pathways", *Environmental Science & Technology*, **46**(16), pp. 9155-9162 (2012).
21. 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*, **32**(2), pp. 691-701 (2012).
22. Ge, L., Xie, G., Zhang, C. and et al. "An evaluation of China's water footprint", *Water Resources Management*, **25**(10), pp. 2633-2647 (2011).
23. Liu, C., Ma, C. and Zhang, K. "Going beyond the sectoral boundary: A key stage in the development of a regional industrial ecosystem", *Journal of Cleaner Production*, **22**(1), pp. 42-49 (2012).
24. Mekonnen, M.M. and Hoekstra, A.Y. "A global assessment of the water footprint of farm animal products", *Ecosystems*, **15**(3), pp. 401-415 (2012).
25. 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*, **60**(1), pp. 186-203 (2006).
26. Erclin, 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*, **25**(2), pp. 721-741 (2011).
27. Erclin, A.E., Aldaya, M.M. and Hoekstra, A.Y. "The water footprint of soy milk and soy burger and equivalent animal products", *Ecological Indicators*, **18**, pp. 392-402 (2012).
28. 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*, **57**, pp. 238-248 (2013).

29. 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*, **26**(3), pp. 733-749 (2012).
30. Hightower, M. and Pierce, S.A. "The energy challenge", *Nature*, **452**(7185), pp. 285-286 (2008).
31. Doe, U. "Energy demands on water resources", Report to Congress on the interdependency of energy and water, Washington DC: US Department of Energy, 1 (2006).
32. Mielke, E., Anadon, L.D. and Narayanamurti, V. "Water consumption of energy resource extraction, processing, and conversion", Belfer Center for Science and International Affairs (2010).
33. Goodwin, S., Douglas, C. and Carlson, K. "Lifecycle analysis of water use and intensity of noble energy oil and gas recovery in the Wattenberg field of northern Colorado", Fort Collins: Colorado State University (2012).
34. Jordaan, S., Anadon, L., Mielke, E. and et al. "Regional water-and land-use implications of reducing oil imports with natural gas, shale oil, or biofuels in the United States", *Environ Sci Technol*, **47**(21), pp. 11976-11984 (2013).
35. Gerdes, K. and Nichols, C. "Water requirements for existing and emerging thermoelectric plant technologies", Rep. DOE/NETL-402/80-108 (2009).
36. Macknick, J., Newmark, R., Heath, G. and et al. "A review of operational water consumption and withdrawal factors for electricity generating technologies", *Contract*, **303**, pp. 275-300 (2011).
37. 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*, **1**(3), pp. 285-297 (2015).
38. Williams, E.D. and Simmons, J.E. "Water in the energy industry: An introduction", [www.bp.com/energy-sustainabilitychallenge](http://www.bp.com/energy-sustainabilitychallenge) (2013) (visited on June 2017).
39. 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*, **19**(14), pp. 1582-1589 (2011).
40. Cement Technology, "Fuel problems of cement manufacturers", *Cement technology*, **53**, <http://www.cementtechnology.ir/Reports/Report-6.pdf> (visited on June 2017) pp. 1-3, (In Persian) (2012).
41. King, C.W. and Webber, M.E. "Water intensity of transportation", ACS Publications (2008).
42. Spiess, W. "Virtual water and water footprint of food production and processing", *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*, pp. 333-355 (2014).
43. Domenech Quesada, J.L. "Huella ecologica y desarrollo sostenible", *Ecological Footprint and Sustainable Development*. Aenor, Madrid, Spain (2007).
44. Forare Hoekstra, A.Y. "The water footprint of food", Forare J. (ed.) *Water for food*, The Swedish Research Council for Environment, Agricultural Sciences and Spatial Planning (Formas), Stockholm, Sweden, (2008). 49-60 pp.