

# ارزیابی محیط‌زیستی سامانه‌های آب و فاضلاب شهری از نظر تولید گازهای گلخانه‌ای (مطالعه موردی: شهر ساری)

مسعود تابش<sup>۱\*</sup>، قاسم کاظم‌نژاد سنگرودی<sup>۲</sup>، اکبر شیرزاد<sup>۳</sup>

۱. استاد، دانشکده مهندسی عمران و عضو قطب علمی مهندسی و مدیریت زیرساخت‌های عمرانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۲. کارشناسی‌ارشد مهندسی عمران- محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

ghkazemnejad@gmail.com

a.shirzad@uut.ac.ir

۳. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی ارومیه

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۲/۲۲

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۵/۴/۲۹

## چکیده

آب از ضروری‌ترین عوامل توسعه انسانی و ایران نیز از جمله کشورهایی است که برای تأمین آب در مصارف مختلف، به‌خصوص آب آشامیدنی، دچار مشکل است. این مسئله از مهم‌ترین دغدغه‌های دولتمردان در راستای توسعه پایدار بوده است. از طرفی، تجهیزات، انرژی و مواد شیمیایی مصرف‌شده در تهیه آب آشامیدنی، آثار محیط‌زیستی‌ای در پی دارد که تشدید گرمایش جهانی به دلیل افزایش گازهای گلخانه‌ای، از جمله این آثار است. در این پژوهش میزان گاز دی‌اکسید کربن معادل که عامل اصلی گرمایش جهانی است، با ابزار محیط‌زیستی ارزیابی چرخه حیات و با استفاده از نرم‌افزار SimaPro در چرخه آب آشامیدنی تخمین زده شده است. برای این کار شهر ساری به عنوان مطالعه موردی انتخاب و تأمین آب از چاه، همچنین در سه سناریو، جایگزینی منابع آب زیرزمینی با آب سد شهید رجایی بررسی شد. طبق نتایج به دست آمده، چنانچه تأمین آب از محل سد شهید رجایی انجام پذیرد، میزان آثار محیط‌زیستی (مقدار دی‌اکسید کربن معادل تولید شده) به مقدار زیادی کاهش می‌یابد. همچنین، در بین مراحل چرخه آب آشامیدنی، برداشت آب بیشترین تأثیر را در تولید گاز دی‌اکسید کربن معادل دارد. از بین عوامل مؤثر در تولید گاز دی‌اکسید کربن نیز مصرف برق بیشترین تأثیر را داشته است.

## کلیدواژه

ارزیابی چرخه حیات، چرخه آب آشامیدنی، سامانه آب و فاضلاب شهری، گازهای گلخانه‌ای، نرم‌افزار SimaPro.

## مقدمه

گرمایش جهانی است که دی‌اکسید کربن معادل، مهم‌ترین عامل آن محسوب می‌شود.

با گسترش شهرها، افزایش جمعیت و ارتقای سطح بهداشت، و برداشت آب از منابع سطحی و زیرزمینی میزان و تنوع آلاینده‌های فاضلاب و منابع آب افزایش یافته است. بنابراین، استحصال آب از این منابع و تصفیه فاضلاب به انرژی و مواد شیمیایی بیشتری نیاز دارد. با وجود این، باید

سامانه‌های آب و فاضلاب شهری همانند دیگر زیرساخت‌ها باید در چارچوب توسعه پایدار احداث و بهره‌برداری شود. بنابراین، ارزیابی آثار محیط‌زیستی مربوط به ساخت و بهره‌برداری از این سامانه‌ها به منظور شناخت آثار منفی وارد بر محیط‌زیست و تلاش برای تقلیل این آثار ضروری به نظر می‌رسد. یکی از آثار محیط‌زیستی بحث

۹۱ درصد انتشار گازهای گلخانه‌ای مربوط به دوره بهره‌برداری از سامانه آبرسانی است. همچنین، از بین چهار عامل تولید مواد، حمل مواد، استفاده از تجهیزات و تولید انرژی، مورد آخر بیشترین سهم را در انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد. Racoviceanu و همکاران (۲۰۰۷) پژوهشی در مورد مصرف انرژی و تغییرات آب‌وهوایی در سیستم تصفیه آب شهر تورنتو انجام دادند. بر اساس نتایج این پژوهش، فاز بهره‌برداری ۹۰ درصد مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای را به خود اختصاص داده است.

روغنی (۱۳۹۲) مقدار دی‌اکسید کربن معادل فاز بهره‌برداری شبکه جمع‌آوری فاضلاب را برآورد کرده است. برای این کار، انرژی مصرفی در فعالیت‌های بازرسی و عملیات مربوط به نگهداری لوله‌های شبکه، همچنین تعمیرات لوله وارد محاسبات شده و به دلیل ثقلی بودن سیستم جمع‌آوری فاضلاب، از انرژی پمپاژ صرف‌نظر شده است. فیضی ماسوله (۱۳۹۲) آثار محیط‌زیستی فاز بهره‌برداری تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران را با رویکرد LCA و با استفاده از نرم‌افزار SimaPro بررسی کرد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از لجن به‌منزله کود کشاورزی موجب ایجاد آثار مثبت قابل توجهی می‌شود. این امر به دلیل صرفه‌جویی در مصرف انرژی مورد نیاز به‌منظور تولید کود شیمیایی است.

Sanjuan-Delmás و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از رویکرد LCA، آثار محیط‌زیستی لوله‌های انتقال آب و شبکه توزیع آب با جنس‌های مختلف را بررسی و مقایسه کردند. آن‌ها فقط فاز ساخت شبکه توزیع آب را در نظر گرفتند و فاز بهره‌برداری و نگهداری شبکه را وارد محاسبات نکردند. از پژوهش‌های دیگر در این زمینه می‌توان به پژوهش Herstein و همکاران (۲۰۱۰) روی شبکه توزیع آب و پژوهش‌های Flores و همکاران (۲۰۱۱)، و Fine و Hadas (۲۰۱۲) روی تصفیه‌خانه فاضلاب اشاره کرد.

در این میان تعداد مطالعاتی که کل چرخه آب

توجه داشت که تجهیزات، انرژی و مواد شیمیایی مصرف‌شده در چرخه آب آشامیدنی (شامل مراحل چون برداشت آب از منابع تأمین، تصفیه آب، جمع‌آوری فاضلاب و تصفیه فاضلاب) آثار محیط‌زیستی‌ای در پی دارد که تشدید گرمایش جهانی به دلیل افزایش گازهای گلخانه‌ای، ازجمله این آثار است.

ابزارهای مختلفی برای بررسی پایداری سامانه آب و فاضلاب شهری وجود دارد. ارزیابی چرخه حیات<sup>۱</sup> (LCA) یکی از این ابزارهاست. این ابزار برای تحلیل آثار محیط‌زیستی محصول یا فرایند مفید است و اطلاعات کلی و عددی در مورد مصرف منابع و خروجی‌های محیط‌زیستی سیستم مورد مطالعه را ارائه می‌کند (Suh & Rousseaux, 2002). این روش، تخمین تمامی آثار محیط‌زیستی تجمعی را ممکن ساخته است و چشم‌اندازی جامع را از جنبه‌های محیط‌زیستی فرایند یا محصول با لحاظ آثار چرخه حیات ارائه می‌دهد. با توجه به پیشینه مطالعات، روش ارزیابی چرخه حیات ابزار مناسبی برای بررسی پایداری سامانه آب و فاضلاب شهری است.

در سال‌های اخیر، برای بررسی آثار محیط‌زیستی شبکه توزیع آب، شبکه جمع‌آوری فاضلاب و تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب مطالعاتی با استفاده از ابزار LCA صورت گرفته است. برای نمونه Zhang و Wilson (۲۰۰۰) گاز تولیدشده را طی مراحل تولید، حمل و نصب لوله‌های شبکه جمع‌آوری فاضلاب تخمین زدند. آن‌ها خاطر نشان کردند که مراحل حمل و نقل و نصب لوله به‌روشنی سستی حفر ترانشه در حدود ۱۳ درصد از کل مقدار دی‌اکسید کربن معادل آزادشده تا ابتدای دوره بهره‌برداری را تشکیل می‌دهد.

Stokes و Horvath (۲۰۰۶) با استفاده از روش LCA، سه سناریوی افزایش برداشت از منابع آب شیرین، شیرین‌سازی آب شور دریا و بازچرخانی پساب تصفیه‌خانه فاضلاب را برای تأمین نیازهای جدید آبی در دو مطالعه موردی در کالیفرنیا بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که ۶۰ تا

موجود در زمینه دسترسی به حجم وسیعی از اطلاعات و داده‌های مورد نیاز روش ارزیابی چرخه حیات است. همچنین، رویکرد محیط‌زیستی در احداث زیرساخت‌ها آن‌چنانکه باید مورد توجه سیاستگذاران و تصمیم‌گیرندگان قرار نداشته است. با توجه به روند روزافزون احداث تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب، همچنین ایجاد سیستم جمع‌آوری فاضلاب و جایگزینی و گسترش شبکه توزیع آب در اقصی نقاط کشور، بررسی عملکرد محیط‌زیستی این زیرساخت‌ها به‌منظور شناسایی مسائل و مشکلات محیط‌زیستی محتمل، برای مدیران و تصمیم‌گیرندگان بخش آب و فاضلاب اهمیتی مضاعف پیدا کرده است.

هدف از پژوهش حاضر ارزیابی چرخه حیات آب آشامیدنی به‌منظور تخمین پتانسیل گرمایش جهانی آن و بررسی حالت‌های جایگزین با حداقل آثار است. همچنین، تعیین مراحل که بیشترین اثر را بر گرمایش جهانی دارد از اهداف این پژوهش است که این نتایج برای استفاده مدیران و تصمیم‌گیرندگان در خور توجه است. برای رسیدن به هدف‌های ذکرشده، چرخه آب آشامیدنی شهر ساری در چهار مرحله برداشت و توزیع آب و جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. در پژوهش حاضر مرز سیستم از لحظه برداشت آب تا خروج فاضلاب تصفیه‌شده از تصفیه‌خانه فاضلاب است و تمامی اطلاعات از شرکت آب و فاضلاب استان مازندران تهیه شده که مقادیر آن به‌ازای ۱ مترمکعب آب در محل مصرف، محاسبه شده است. دی‌اکسید کربن معادل تولیدی و شاخصی برای ارزیابی محیط‌زیستی چرخه آب آشامیدنی در نظر گرفته شده و برای محاسبه مقدار آن نیز از نرم‌افزار SimaPro استفاده شده است.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲.۱. ارزیابی چرخه حیات (LCA)

LCA عبارت است از روشی که در آن تمامی آثار محیط‌زیستی مرتبط با محصول در کل چرخه حیات آن ارزیابی می‌شود. این روش رویکرد گهواره تا گور است که

آشامیدنی را بررسی کرده‌اند بسیار محدود بوده است. برای نمونه Lundie و همکاران (۲۰۰۴) در مطالعه‌ای موردی، چرخه آب آشامیدنی شهر سیدنی را ارزیابی کردند. هدف این مطالعه مقایسه چندین سناریوی طراحی از لحاظ عملکرد پایدار بود. Friedrich و همکاران (۲۰۰۹) به بررسی بارهای محیط‌زیستی آب آشامیدنی در شهر دوربان پرداختند. در این پژوهش به مراحل چون برداشت، تصفیه و توزیع آب، جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب و بازیافت آب توجه شده است. برای عرضه آب به مشترکان جدیدی که تازه‌حال اشتراک نداشته‌اند دو سناریوی متفاوت و سه گزینه مختلف (حداکثر استفاده از زیرساخت‌ها و دارایی‌های موجود، بازیافت آب و احداث زیرساخت‌های جدید) بررسی شد. با توجه به نمرات محاسبه‌شده آثار هر دو سناریو، بازیافت آب، پس از گزینه حداکثر استفاده از دارایی‌ها، گزینه دوستدار محیط‌زیست شناخته شد. طبق نتایج این پژوهش، احداث زیرساخت‌های جدید، بارهای محیط‌زیستی بیشتر و استفاده از آب بطری (به‌عنوان سناریوی اضافی) بیشترین بار محیط‌زیستی را دارد. Lemos و همکاران (۲۰۱۳) آثار محیط‌زیستی سامانه آب شرب شهر Aviero در پرتغال را با استفاده از روش LCA بررسی کردند. آن‌ها مراحل و روندهایی را مشخص کردند که بیشترین اثر محیط‌زیستی را داشت و سناریوهایی را برای بهبود آن بررسی و معرفی کردند. Amores و همکاران (۲۰۱۳) آثار محیط‌زیستی هر یک از مراحل چرخه آب شهری را بررسی کردند، شامل برداشت و تصفیه آب، پمپاژ میانی، شبکه توزیع آب، شبکه جمع‌آوری و تصفیه‌خانه فاضلاب در شهر تاراگونا در منطقه مدیترانه.

علی‌رغم آنکه سابقه استفاده از روش ارزیابی چرخه حیات در جهان به بیش از سه دهه قبل برمی‌گردد، در ایران همچون سایر کشورهای در حال توسعه مزایای استفاده از این روش آن‌طور که باید شناخته‌شده نیست و از این روش کمتر در حل مسائل واقعی سامانه‌های آب و فاضلاب استفاده شده است. یکی از دلایل این امر، محدودیت‌های

با جمع‌آوری مواد خام از زمین آغاز می‌شود و با برگشت محصول مصرف‌شده به زمین پایان می‌یابد. روش LCA در ارزیابی همه ورودی‌ها و خروجی‌های محصول، ارزیابی مواد زائد، آثار بر بهداشت انسان، آثار بوم‌شناختی و تفسیر نتایج ارزیابی به کار می‌رود (Suh & Rousseaux, 2002).

ارزیابی چرخه حیات شامل چهار مرحله است: تعیین هدف و محدوده، تحلیل فهرستی، ارزیابی آثار، و تفسیر. مرحله هدف و محدوده نخستین و احتمالاً مهم‌ترین مرحله است، زیرا اجزایی که در این مرحله تعریف می‌شود مانند هدف، محدوده و فرضیه اصلی، کلید مطالعه است. محدوده مطالعه شامل تعیین سیستم، مرزهای آن (مفهومی، جغرافیایی و زمانی) و کیفیت داده‌های مورد استفاده و فرضیه اصلی است. تعیین واحد عملیاتی، یکی از موضوعات مهم در این مرحله است. واحد عملیاتی، واحد محصول یا خدماتی است که آثار محیط‌زیستی آن باید بررسی یا مقایسه شود که معمولاً به شکل مقدار ماده بیان می‌شود. تحلیل فهرست یا سیاهه‌نویسی فرایندی است شامل جمع‌آوری داده‌ها برای کمی کردن ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم طبق آنچه در هدف مطالعه مشخص شده است. تفسیر، آخرین گام در مطالعه LCA است که در آن نتایج به صورت ترکیبی نمایش داده می‌شود و منابع آثار بحرانی و گزینه‌های کاهش این آثار مشخص می‌گردد. این گام شامل مروری بر تمامی مراحل LCA در بررسی تطابق فرضیات و کیفیت داده‌ها با توجه به هدف و محدوده مطالعه است (Heijungs et al., 1992).

## ۲.۲. معرفی نرم‌افزار SimaPro

SimaPro یکی از نرم‌افزارهای متداول در ارزیابی آثار چرخه حیات است که تاکنون در مطالعات مختلفی به کار گرفته شده است. در این پژوهش نیز از نرم‌افزار مذکور (نسخه ۵/۱) برای محاسبه میزان گازهای گلخانه‌ای تولیدشده طی فازهای مختلف سامانه آب و فاضلاب شهری، با واحد کیلوگرم دی‌اکسید کربن معادل استفاده

شده است. یکی از ویژگی‌های برجسته این نرم‌افزار دسترسی به طیف وسیعی از داده‌هاست که اکثر فرایندها را پوشش می‌دهد. برای محاسبه میزان دی‌اکسید کربن معادل، داده‌ها به دسته‌هایی همچون مواد مصرفی، الکتریسیته و گرما طبقه‌بندی می‌شود. سپس، نرم‌افزار SimaPro 5.1 با استفاده از پایگاه‌های داده موجود، این ورودی‌ها را به گازهای گلخانه‌ای تبدیل می‌کند. پس از محاسبه میزان گازهای گلخانه‌ای تولیدی، تمامی گازها به گاز دی‌اکسید کربن معادل تبدیل می‌شود.

## ۳.۲. مطالعه موردی

در این پژوهش شهر ساری مطالعه موردی در نظر گرفته شده است. در حال حاضر، جمعیت این شهر که از آب شرب بهره می‌برند حدود ۳۵۰,۰۰۰ نفر است که از این تعداد حدود ۵۷,۰۰۰ نفر از سامانه جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب بهره‌مندند. سامانه جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب شهر ساری با افق ۱۴۰۵، برای جمعیتی بالغ بر ۴۲۰,۰۰۰ نفر طراحی شده است. در این مطالعه، چرخه آب آشامیدنی شهر ساری به چهار مرحله برداشت آب، توزیع آب، جمع‌آوری فاضلاب و تصفیه فاضلاب تقسیم شده است که در تمامی آن برق مصرفی از گاز طبیعی تولید می‌شود. نقشه شهر ساری در شکل ۱ آمده است. لازم به ذکر است آمار سامانه آب و فاضلاب شهر ساری و مورد استفاده در این پژوهش مربوط به سال ۱۳۹۳ است.

آب شهر ساری از ۲۸ حلقه چاه تأمین می‌شود که ده حلقه مستقیماً به شبکه توزیع آب تزریق و ۱۸ حلقه به دو مخزن زمینی کرمانی و نسایی منتقل می‌شود. در زمان انجام تحقیق (سال ۱۳۹۳) برداشت آب از این چاه‌ها ۱۱۸۰ لیتر بر ثانیه بوده است که ۱۸ درصد از آب برداشتی به دلیل نشت تلف می‌شود (شرکت آب و فاضلاب استان مازندران، ۱۳۹۴). ابعاد ترانше کارگذاری لوله‌های شبکه توزیع آب در شکل ۲ آمده است. همچنین، مشخصات لوله‌های به کار رفته در شبکه توزیع آب در جدول ۱ ارائه

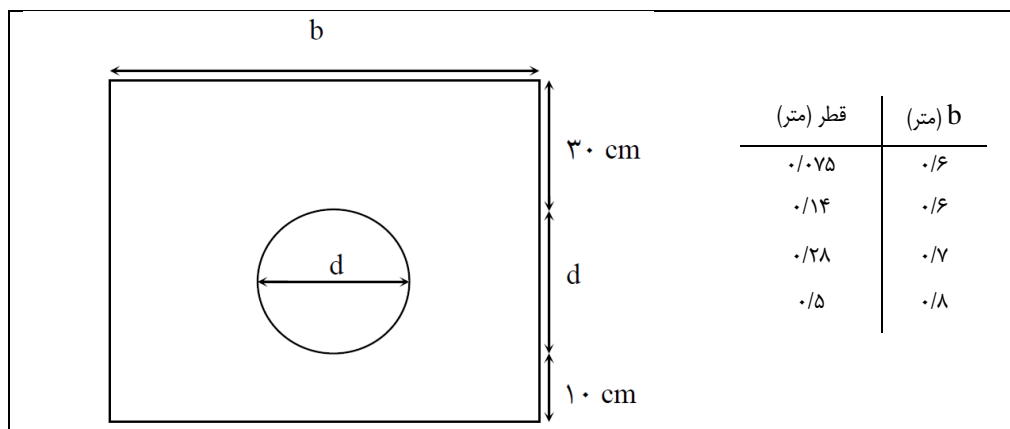
در حال حاضر ۳۰۴ کیلومتر از این طرح اجرا شده است. میزان تولید سرانه فاضلاب ۱۷۵ لیتر بر نفر بر روز است (شرکت آب و فاضلاب استان مازندران، ۱۳۹۴). در حال حاضر ۱۵۰۰۰ مشترک به این شبکه متصل‌اند که از این تعداد ۱۱۴۰۰ مشترک فعال‌اند. ابعاد ترانشه و مشخصات لوله‌های به‌کاررفته در شبکه جمع‌آوری فاضلاب در جدول ۲ ارائه شده است.

شده است. ۳۰۳ کیلومتر از این لوله‌ها ده ساله، ۱۹۱ کیلومتر ۱۵ ساله، ۱۵۷ کیلومتر ۲۲ ساله و ۱۳۱ کیلومتر ۳۰ ساله است.

عملیات اجرایی شبکه جمع‌آوری فاضلاب شهرستان ساری در سال ۱۳۸۲ آغاز شد که در انتهای طرح شامل چهار فاز و ۶۷۰ کیلومتر شبکه اصلی و فرعی خواهد بود. این طرح در سال ۱۳۹۱ به‌صورت آزمایشی و در اردیبهشت ۱۳۹۲ به‌صورت قطعی به بهره‌برداری رسید که



شکل ۱. نقشه منطقه ساری



شکل ۲. مشخصات ترانشه شبکه توزیع آب (شرکت آب و فاضلاب استان مازندران، ۱۳۹۴)

جدول ۱. مشخصات لوله‌های استفاده شده در شبکه توزیع آب (شرکت آب و فاضلاب استان مازندران، ۱۳۹۴)

قطر لوله پلی اتیلن (mm)	طول لوله (km)	وزن واحد طول (kg)
۷۵	۱۱۱	۱/۰۲
۱۴۰	۴۵۷	۳/۴۶
۲۸۰	۱۹۰	۱۳/۷
۵۰۰	۲۵	۴۳/۸

جدول ۲. مشخصات لوله‌ها و ابعاد ترانشه در شبکه جمع‌آوری فاضلاب

قطر لوله (mm)	وزن واحد طول (kg)	طول لوله (km)	ارتفاع ترانشه (cm)	عرض ترانشه (cm)
۲۰۰	۲/۵	۷۱۰۰۰	۲۱۰	۱۷۵
۲۵۰	۳/۶۵	۷۱۰۰۰	۲۱۵	۱۸۲
۳۱۵	۵/۸۳	۷۱۰۰۰	۲۱۵	۱۹۲
۴۰۰	۸/۸۳	۳۰۳۳۳	۷۰۰	۴۴۰
۵۰۰	۱۴/۱۶	۳۰۳۳۳	۷۰۰	۴۵۰
۶۰۰	۱۹	۳۰۳۳۳	۷۰۰	۴۶۰

در شهر ساری تا تیر ۱۳۹۴ از منابع زیرزمینی بوده است. همچنین، بالا بودن سطح آب زیرزمینی، استفاده از کودهای کشاورزی، همچنین استفاده مردم از چاه‌های جذبی برای دفع فاضلاب، موجب آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌شود. بنابراین، دلایل، جایگزین شدن این منابع با منابع دیگر همواره مطرح بود تا اینکه جایگزین شدن این منابع با آب سد شهید رجایی تا سال ۱۴۰۵، تصویب شد. بدین منظور، آب سد شهید رجایی به تصفیه‌خانه آب کیاسر منتقل و در آنجا تصفیه می‌شود. این تصفیه‌خانه ۲۵ کیلومتر از نقطه

تصفیه‌خانه فاضلاب شهر ساری در چهار مدول طراحی شده است که مدول اول آن در سال ۱۳۸۹ به بهره‌برداری رسید. دبی متوسط این مدول که جمعیتی بالغ بر ۱۰۵,۰۰۰ نفر را پوشش می‌دهد، ۲۶۹ لیتر بر ثانیه و دبی حداکثری آن ۵۴۶ لیتر بر ثانیه است. در حال حاضر، فاضلاب جمع‌آوری شده و تصفیه شده در مدول اول ۱۰,۰۰۰ مترمکعب در روز است. مدول دوم این تصفیه‌خانه تا پایان سال ۱۳۹۳ به بهره‌برداری خواهد رسید. به دلیل نبود زیرساخت‌های لازم، تمامی برداشت آب

خاک‌برداری و خاک‌ریزی، مقدار بتن، میلگرد و ورق فولادی به‌کاررفته برای ساخت مدل مهم بوده است که مقدار کل آن‌ها در جدول ۵ ارائه شده است. تصفیه‌خانه آب کیاسر در دو مدول تعریف شده است که مدول اول و دوم آن باید به ترتیب در سال ۱۴۰۵ و ۱۴۲۵ به بهره‌برداری برسد. مدول اول برای جمعیت ۴۲۰,۰۰۰ نفر به میزان ۱۵۰۰ لیتر بر ثانیه تعریف شده است.

برداشت آب از سد فاصله دارد و فاصله آن از شهر ساری حدود ۱۱ کیلومتر است. اطلاعات ترانشه و لوله‌های انتقال آب از سد شهید رجایی به تصفیه‌خانه آب کیاسر و از آنجا به شهر ساری در جدول ۳ و فاصله‌های حمل مواد و مصالح به تصفیه‌خانه آب کیاسر در جدول ۴ آمده است. برای ساخت این تصفیه‌خانه و انتقال آب از سد شهید رجایی به تصفیه‌خانه، سپس انتقال آب تصفیه‌شده از محل تصفیه‌خانه به شهر، مقدار لوله به‌کاررفته، میزان

جدول ۳. مشخصات ترانشه لوله‌های انتقال آب از سد شهید رجایی به شهر ساری

قطر لوله (mm)	طول لوله (km)	عرض ترانشه (cm)	ارتفاع ترانشه (cm)
۹۰۰	۳۶	۱۵۰	۱۳۰

جدول ۴. فاصله حمل مواد و مصالح به تصفیه‌خانه کیاسر

ماده حمل شده	فاصله حمل (km)
پودر کلر	۷۱۳
گاز کلر	۹۰۳
کلر مایع	۹۰۳
خاک‌ریزی	۲۰
خاک‌برداری	۱۵
لوله	۷۱۶

جدول ۵. مواد مصرفی در ساخت تصفیه‌خانه آب کیاسر

مواد مصرفی	مقدار کل
آب برداشتی در طول عمر ۵۰ سال تصفیه‌خانه آب (m <sup>۳</sup> )	۲۲۰۷۵۲۰۰۰
بتن (m <sup>۳</sup> )	۲۵۰۰۰
میلگرد (ton)	۲۰۰۰
ورق فولادی (ton)	۶۰۰
خاک‌برداری (ton)	۱۱۲۳۲۰
خاک‌ریزی (ton)	۸۰۴۲۶
لوله (ton)	۶۱۹۲

## ۳. نتایج و بحث

نتایج ارزیابی چرخه حیات آب آشامیدنی شهر ساری و مقایسه سناریوهای مختلف جایگزینی منابع آب به شرح زیر است.

## ۱.۳. مدل‌سازی مرحله برداشت آب

برای محاسبه مقدار دی‌اکسید کربن معادل در مرحله برداشت آب، میزان آب شستشوی شبکه توزیع و مخازن با نظر کارشناسان شرکت آب و فاضلاب استان مازندران ۱۰ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. در مرحله برداشت آب مقدار دی‌اکسید کربن معادل برابر با  $1/23 \text{ m}^3$  آب /  $0/236 \text{ kg}$  دی‌اکسید کربن است که مصرف الکتریسیته با  $98/2$  درصد این آثار، مهم‌ترین عامل شناخته شده است. البته، باید توجه داشت که منابع آب ساری از نوع زیرزمینی است و در نتیجه مصرف الکتریسیته آن بسیار زیاد است. همچنین، تولید برق در نیروگاه حرارتی و از منابع سوخت‌های فسیلی این آثار را تشدید می‌کند. در این قسمت مواد شیمیایی آثار کمی در پی داشته است.

## ۲.۳. مدل‌سازی شبکه توزیع آب

برای محاسبه مقدار دی‌اکسید کربن معادل در مرحله توزیع آب، طول عمر لوله‌های شبکه توزیع آب پنجاه سال در نظر گرفته شده و مقدار خاک‌برداری و خاک‌ریزی برای نصب لوله‌ها مدل شده است. مقادیر خاک‌برداری و خاک‌ریزی به گونه‌ای مدل شده است که کامیون‌ها فقط در مسیر رفت در حال حمل بار باشد و خالی برمی‌گردد. اثر تولید لوله‌ها با وزن لوله و بهره‌برداری شبکه با میزان برق مصرفی وارد محاسبات شده است. به دلیل گستردگی کار، به نگهداری از شبکه توجه نشده است.

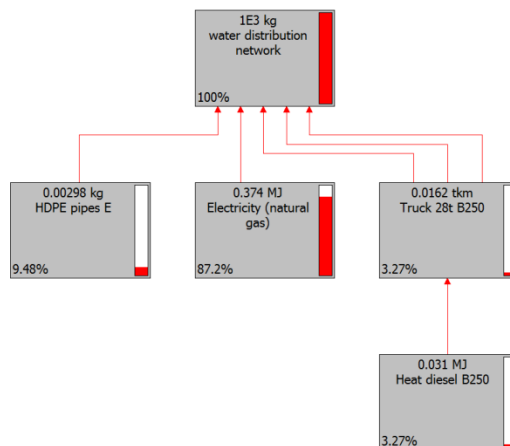
در مدل‌سازی این مرحله فرض بر آن است که تمامی

لوله‌ها از جنس پلی‌اتیلن بوده است. با توجه به اینکه محاسبات بر اساس مقادیر واقعی در سال ۱۳۹۳ بوده، فرض شده است که سن لوله‌ها بر تغییرات دبی بی‌تأثیر است و تغییر دبی به جمعیت و تقاضا بستگی دارد. برای محاسبه میزان آب عبوری، مقدار دبی در سال ۱۳۹۳ برابر ۱۱۸۰ لیتر بر ثانیه و در سال ۱۴۰۵ برابر ۱۵۰۰ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شده است (شرکت آب و فاضلاب استان مازندران، ۱۳۹۴) که در طول زمان به صورت خطی تغییر می‌کند. برای مدل‌سازی مقدار لوله مصرفی، مقدار خاک‌برداری و خاک‌ریزی، نخست عددی به نام عدد تخصیص محاسبه شد که برابر با نسبت آب عبوری در سال ۱۳۹۳ به دبی عبوری طی ۵۰ سال است. سپس، از حاصل ضرب این عدد در مقدار کل لوله، خاک‌برداری و خاک‌ریزی کل، مقدار مربوط به سال ۱۳۹۳ به دست آمده که در نرم‌افزار SimaPro وارد شده است. برای محاسبه وزن خاک‌برداری، دانسیته خاک برابر با ۱۶۰۰ و برای محاسبه وزن خاک‌ریزی، دانسیته خاک برابر با ۱۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است. از آنجا که خاک برداشتی باید به بیرون از شهر منتقل شود، فاصله حمل آن ۱۰ کیلومتر در نظر گرفته شده، همچنین فاصله حمل خاک‌ریزی ۳۵ کیلومتر است. مقادیر مربوط به سال ۱۳۹۳ که وارد محاسبات شده در جدول ۶ آمده است. در مرحله توزیع آب، میزان اثر  $0/0779 \text{ m}^3$  آب /  $0/0779 \text{ kg}$  دی‌اکسید کربن به دست آمده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که مصرف برق با حدود ۸۷ درصد نقش مهمی در این آثار دارد که به دلیل نوع تولید برق است. لوله‌ها نیز به دلیل مواد مصرف‌شده در تولید با ۹ درصد اثر در رتبه بعدی قرار دارد. رتبه سوم هم با حدود ۳ درصد مربوط به حمل و نقل است که این اثر بیشتر به دلیل میزان خاک‌برداری است (شکل ۳).



جدول ۶. اطلاعات شبکه توزیع آب، استفاده شده در ساخت مدل SimaPro

۳۷۲۱۲۴۸۰	مقدار آب ورودی به شبکه سال ۱۳۹۳ ( $m^3$ )
۳۰۱۹۸۸۷۴	مقدار آب خروجی از شبکه سال ۱۳۹۳ ( $m^3$ )
پلی اتیلن	جنس لوله
۵۳۹۲۴۴۰	وزن کل لوله (ton)
۸۹۸۷۸	وزن لوله تخصیص یافته در سال ۱۳۹۳ (ton)
۲۷۵	فاصله حمل لوله (km)
۴۶۱۰۲۸	وزن کل خاک‌برداری (ton)
۱۰۵۱۷۳	وزن خاک‌برداری تخصیص یافته در سال ۱۳۹۳ (ton/km)
۱۰	فاصله حمل خاک‌برداری (km)
۴۴۸۸۳۷	وزن کل خاک‌ریزی (ton)
۳۵۸۳۷۲	وزن خاک‌ریزی تخصیص یافته در سال ۱۳۹۳ (ton/km)
۳۵	فاصله حمل خاک‌ریزی (km)
۳۱۳۶۲۷۰	مصرف الکتریسیته در سال ۱۳۹۳ (kwh)



شکل ۳. عوامل مؤثر در تولید دی‌اکسید کربن معادل در شبکه توزیع آب

### ۳.۳. مدل سازی شبکه جمع آوری فاضلاب

با توجه به اینکه در این پژوهش آثار سال ۱۳۹۳ بررسی می‌شود، ۳۰۴ کیلومتر از لوله‌های شبکه جمع‌آوری فاضلاب و جمعیت تحت پوشش ۵۷,۰۰۰ نفری وارد محاسبات شده است (فاز نخست). در شهر ساری، در طول مسیر ایستگاه پمپاژ (تلمبه‌خانه) در نظر گرفته شده است. برای محاسبه مقدار لوله، مقدار خاک‌ریزی و خاک‌برداری همانند مرحله توزیع آب از ضریب تخصیص استفاده شده

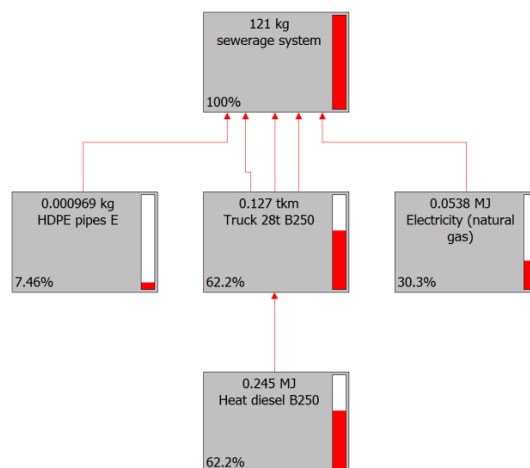
است که برای محاسبه آن، مقدار دبی سال ۱۳۹۳ برابر با ۱۰,۰۰۰ مترمکعب در روز بود (تعداد ۵۷,۱۴۳ نفر با دبی ۱۷۵ لیتر در روز) و در سال ۱۴۰۰ به ظرفیت کامل خود، یعنی پوشش جمعیت ۱۰۵,۰۰۰ نفر و سرانه تولید فاضلاب ۱۷۵ لیتر در روز، می‌رسد. تغییر دبی از سال ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۰ به صورت خطی فرض شده و از آنجا که این شبکه در سال ۱۳۸۹ به بهره‌برداری رسیده و طول عمر آن نیز ۵۰ سال در نظر گرفته شده است، این شبکه تا سال ۱۴۳۳ در

$0.21 \text{ m}^3 / 0.322 \text{ kg}$  دی‌اکسید کربن بوده که  $62/2$  درصد این مقدار در اثر حمل‌ونقل بوده است. در قسمت حمل‌ونقل، دور بودن معادن شن و ماسه از محل پروژه سبب شده تا آثار خاک‌ریزی به‌شدت افزایش یابد. باید توجه داشت با اینکه مقدار خاک‌ریزی از مقدار خاک‌برداری کمتر است، اما اثر آن بیش از دو برابر آثار خاک‌برداری است که دلیل آن، فاصله حمل است. همچنین،  $30/3$  درصد آثار مربوط به مصرف برق و  $7/5$  درصد از آثار هم مربوط به لوله‌هاست (شکل ۴).

حال بهره‌برداری خواهد بود و از سال ۱۴۰۰ تا ۱۴۳۳ با ظرفیت کامل، دبی را منتقل خواهد کرد. در این مرحله تمامی حمل‌ونقل‌ها به‌گونه‌ای انجام شده است که کامیون‌ها فقط در مسیر رفت در حال حمل بار باشد و در مسیر برگشت خالی برگردد. همچنین، پمپاژ فاضلاب به‌صورت برق مصرفی در نظر گرفته شده و اطلاعات مربوط به آن وارد نرم‌افزار شده است. اطلاعات مهم و داده‌های استفاده‌شده در نرم‌افزار SimaPro در جدول ۷ آمده است. در مرحله جمع‌آوری فاضلاب مقدار دی‌اکسید کربن

جدول ۷. اطلاعات شبکه جمع‌آوری فاضلاب، استفاده‌شده در ساخت مدل SimaPro

۲۶۵۱۲۶۹۸۴	مقدار فاضلاب تصفیه‌شده در مدت پنجاه سال ( $\text{m}^3$ )
۳۶۵۰۰۰۰	مقدار فاضلاب تصفیه‌شده در سال ۱۳۹۳ ( $\text{m}^3$ )
پلی‌اتیلن	جنس لوله
۲۱۲۴	وزن کل لوله (ton)
۲۹/۲	وزن لوله تخصیص‌یافته در سال ۱۳۹۳ (ton)
۴۱۰	فاصله حمل لوله (km)
۵۹۳۳۳۱۴	مقدار خاک‌برداری کل (ton)
۸۱۶۸۴۰	مقدار خاک‌برداری تخصیص‌یافته در سال ۱۳۹۳ (ton/km)
۱۰	فاصله حمل خاک‌برداری (km)
۶۲۵۳۸۶۴	مقدار خاک‌ریزی کل (ton)
۳۰۱۳۳۹۸	مقدار خاک‌ریزی تخصیص‌یافته در سال ۱۳۹۳ (ton/km)
۳۵	فاصله حمل خاک‌ریزی (km)
۴۵۱۱۷۶	مصرف الکتریسیته (kwh)



شکل ۴. عوامل مؤثر در تولید دی‌اکسید کربن معادل در شبکه جمع‌آوری فاضلاب

شده و تنها تغییرات دبی در طول زمان به‌صورت خطی فرض شده است. اما، برای محاسبه مقدار مواد استفاده‌شده در مرحله ساخت تصفیه‌خانه فاضلاب همانند مرحله توزیع آب از ضریب تخصیص استفاده شده است. اطلاعاتی که برای ساخت مدل تصفیه‌خانه فاضلاب در نرم‌افزار SimaPro به کار رفته است در جدول ۸ آمده است.

### ۴.۳. مدل‌سازی تصفیه‌خانه فاضلاب

برای مدل‌سازی مدول اول تصفیه‌خانه فاضلاب، طول عمر آن پنجاه سال در نظر گرفته شده است که تغییرات دبی ورودی به‌صورت خطی و در سال ۱۳۹۳ برابر با ۱۰,۰۰۰ مترمکعب در روز و در سال ۱۴۰۰ برابر با ۱۸,۳۷۵ مترمکعب در روز است. مقادیر دبی، مصرف برق و مواد شیمیایی از شرکت آب و فاضلاب استان مازندران اخذ

جدول ۸. اطلاعات تصفیه‌خانه فاضلاب، استفاده‌شده در ساخت مدل SimaPro

۳۶۵۰۰۰۰	مقدار فاضلاب ورودی سال ۱۳۹۳ ( $m^3$ )
۲۶۵۱۲۶۹۸۴	مقدار فاضلاب ورودی در طول ۵۰ سال ( $m^3$ )
۲۳۰۴۰	بتن کل (ton)
۳۱۷	بتن تخصیص داده شده در سال ۱۳۹۳ (ton)
۴۵	ورق فولادی کل (kg)
۶۲۰	ورق فولادی تخصیص داده شده در سال ۱۳۹۳ (kg)
۹۰۰	میلگرد کل (ton)
۱۲/۴	میلگرد تخصیص داده شده در سال ۱۳۹۳ (ton)
۲۰۲۵۶۴۸	الکتریسیته مصرفی ۱۳۹۳ (kwh)
۴۰	مقدار لجن تولیدی در سال ۱۳۹۳ (ton)
۲۴	فاصله حمل لجن (ton)

فاضلاب در این شهر به دلیل نبود زیرساخت‌های لازم و استفاده از چاه‌های جذبی نسبت به میانگین کشور کمتر است.

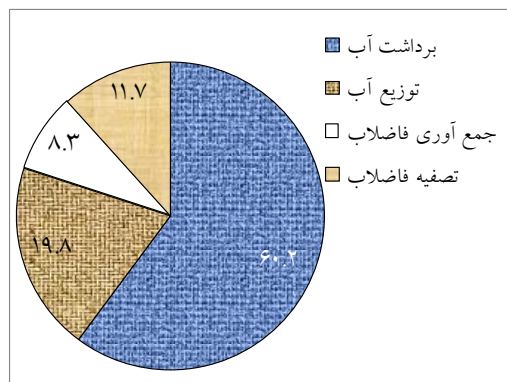
نتایج کل چرخه آب نشان می‌دهد که مقدار دی‌اکسید کربن معادل تولیدشده در تمامی مراحل  $m^3$  ۰/۲۳۳۹۲ آب/  $kg$  ۰/۳۹۲ دی‌اکسید کربن است که این آثار از دو دیدگاه بررسی می‌شود. نخست، از دیدگاه مرحله به مرحله است که مرحله برداشت آب به دلیل مصرف برق زیاد و نوع تولید برق، حدود ۶۰ درصد آثار را به خود اختصاص می‌دهد. سپس، مرحله توزیع آب با اثر حدود ۲۰ درصد، تصفیه فاضلاب با اثر حدود ۱۲ درصد و شبکه جمع‌آوری فاضلاب با اثر حدود ۸ درصد در رتبه‌های بعدی قرار دارد (شکل ۵). برای مقایسه نتایج این پژوهش با کارهای قبلی،

مقدار دی‌اکسید کربن تولیدشده در مرحله تصفیه فاضلاب  $m^3$  ۰/۲۱ فاضلاب/  $kg$  ۰/۰۴۶ دی‌اکسید کربن بوده است که مصرف الکتریسیته به دلیل نوع تولید برق از سوخت‌های فسیلی، با ۹۵/۳ درصد بیشترین اثر را داراست. همچنین، بتن مصرفی در مرحله ساخت با حدود ۳ درصد اثر در رتبه بعدی قرار گرفته است.

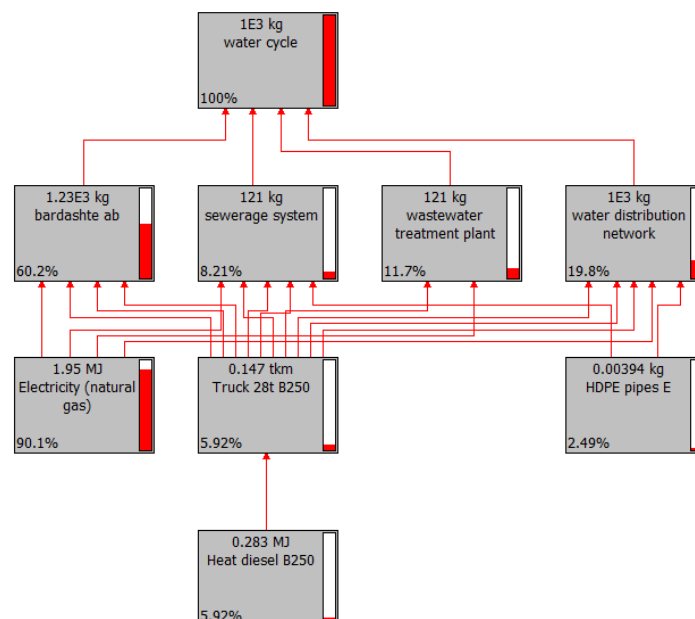
نتایج محاسبات نشان می‌دهد که به ازای هر مترمکعب مصرف آب در شهر ساری، ۱/۲۳ مترمکعب برداشت آب از منابع زیرزمینی و ۰/۱۲۱ مترمکعب فاضلاب جمع‌آوری و تصفیه می‌شود. با توجه به اینکه تا پایان سال ۱۳۸۹ حدود ۳۵ درصد جمعیت شهری ایران تحت پوشش شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب بوده است (شرکت آب و فاضلاب تهران، ۱۳۹۱)، بنابراین جمع‌آوری و تصفیه

محیط‌زیستی متفاوت است. دیدگاه دوم، دید جامع و یکپارچه به چرخه آب آشامیدنی است که آن را به صورت یک مرحله می‌نگرد. در این دیدگاه، مصرف برق به دلیل نوع منابع آب و نوع برق تولیدی با ۹۰ درصد بیشترین اثر را به خود اختصاص می‌دهد. پس از آن حمل نقل با حدود ۶ درصد در رتبه بعدی قرار دارد (شکل ۵). در مطالعه موردی Stokes و Horvath (۲۰۰۶) نیز مصرف برق با سهم ۵۶ تا ۶۹ درصدی در انتشار گازهای گلخانه‌ای، مهم‌ترین عامل بوده است.

می‌توان به مطالعه Stokes و Horvath (۲۰۰۶) اشاره کرد که در آن در سناریوی افزایش برداشت از منابع آب شیرین، همچنین سناریوی شیرین‌سازی آب دریا، مرحله برداشت و تصفیه آب با سهم ۸۳ تا ۸۸ درصد، بیشترین تأثیر را در انتشار گازهای گلخانه‌ای داشته است. ولی در سناریوی بازچرخانی پساب تصفیه‌خانه فاضلاب، بیشترین تأثیر مربوط به مرحله توزیع آب با سهم ۵۳ تا ۷۴ درصد بوده است. این مقایسه نشان می‌دهد که در سامانه‌های مختلف آب و فاضلاب، بسته به شرایط حاکم بر آن، نتایج ارزیابی



شکل ۵. دی‌کسید کربن تولیدشده در کل چرخه حیات



شکل ۶. مهم‌ترین عوامل مؤثر در کل چرخه آب شهری

شهر ساری از سد شهید رجایی و مصرف انرژی برق‌آبی. لازم به ذکر است در این سناریوها اثر مرحله ساخت سد در نظر گرفته نشده است. میزان برق و مواد مصرفی و میزان آب برداشتی در سناریوهای مختلف در جدول ۹ و ۱۰ آمده است.

### ۵.۳. سناریوهای جایگزینی منابع آب زیرزمینی با آب سد شهید رجایی

برای جایگزینی منابع آب زیرزمینی با آب سد شهید رجایی سه سناریوی مختلف در نظر گرفته شده است: ۱. تأمین بخشی از آب شهر ساری از سد شهید رجایی، ۲. تأمین کل آب شهر ساری از سد شهید رجایی و ۳. تأمین کل آب

جدول ۹. میزان تخصیص مواد مصرفی در مرحله ساخت تصفیه‌خانه آب کیاسر در سناریوهای مختلف

عنوان	سناریوی اول	سناریوی دوم	سناریوی سوم
بتن ( $m^3$ )	۱۷۸	۵۳۵/۷	۵۳۵/۷
میلگرد (ton)	۱۴/۳	۴۲/۹	۴۲/۹
ورق فولادی (ton)	۴/۶	۱۳/۹	۱۳/۹
خاک‌برداری (ton/km)	۱۲۰۳۴	۳۶۱۰۳	۳۶۱۰۳
خاک‌ریزی (ton/km)	۱۱۴۹۰	۳۴۴۶۸	۳۴۴۶۸
لوله (kg)	۴۴۲۲۹	۱۳۲۶۸۶	۱۳۲۶۸۶

جدول ۱۰. میزان آب برداشتی، مصرف مواد شیمیایی و برق در سناریوهای مختلف در سال ۱۳۹۳

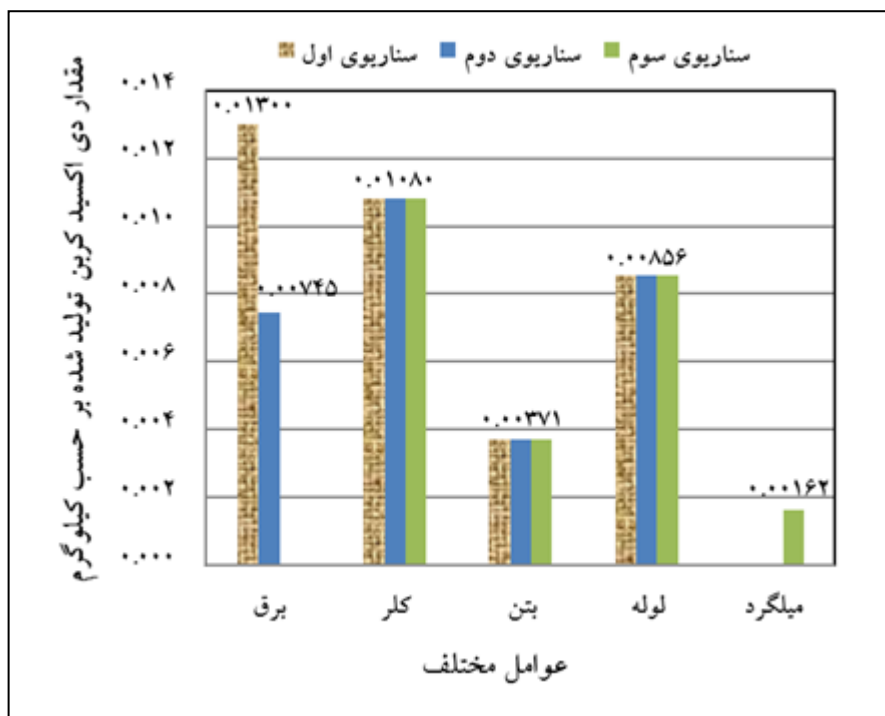
عنوان	سال ۱۳۹۳	سناریوی اول	سناریوی دوم	سناریوی سوم
آب برداشتی ( $m^3$ )	۳۷۲۱۲۴۸۰	۱۵۷۶۸۰۰۰	۴۷۳۰۴۰۰۰	۴۷۳۰۴۰۰۰
میزان مصرف گاز کلر (kg)	۱۴۸۸۰	-	-	-
میزان مصرف پودر کلر (kg)	۲۷۹۱	۱۱۰۳۷۶	۳۳۱۱۲۸	۳۳۱۱۲۸
میزان مصرف کلر مایع (kg)	۱۰۴۲۰۰	-	-	-
برق مصرفی (kwh)	۱۰۷۰۳۰۰۱	۲۲۵۵۰۰	۴۳۸۰۰۰	۴۳۸۰۰۰

و مدول دوم به ۰/۵ مگاوات برق در روز نیاز دارد. در سناریوی نخست، آثار برداشت ۵۰۰ لیتر بر ثانیه آب از سد شهید رجایی برای شبکه توزیع آب بررسی شده است. در این حالت، میزان الکتریسیته مصرفی برابر با ۷۰۰ کیلووات ساعت در روز است که با گاز طبیعی تولید شده در نرم‌افزار SimaPro وارد شده است. در این سناریو، مقدار دی‌اکسید کربن تولیدی  $1/23 m^3$  آب /  $0/389 kg$  دی‌اکسید کربن و ۳۳/۵ درصد این آثار در اثر مصرف برق بوده است. مصرف کلر، استفاده از لوله‌ها و بتن استفاده شده

نقطه برداشت آب از سد شهید رجایی در ارتفاع ۴۸۵ متری از سطح دریاست. همچنین، تصفیه‌خانه در ارتفاع ۱۶۰ متری از سطح دریا واقع شده است که با سد شهید رجایی اختلاف ارتفاع ۳۲۰ متری دارد. این اختلاف ارتفاع برای تولید ۲ مگاوات برق در روز کافی و قرار است در آینده برای این تصفیه‌خانه نیروگاه برق‌آبی احداث شود. این در حالی است که مدول اول تصفیه‌خانه برای تصفیه ۵۰۰ لیتر بر ثانیه تنها به ۰/۷ مگاوات برق در روز و برای تصفیه ۱۵۰۰ لیتر بر ثانیه تنها به ۱/۲ مگاوات برق در روز

در سناریوی دوم، تأمین آب کل شهر ساری در سال ۱۴۰۵ به میزان ۱۵۰۰ لیتر بر ثانیه بررسی شده است. در این سناریو تمامی آب مصرفی از سد شهید رجایی تأمین می‌شود. مقدار آب استحصال‌شده از سد شهید رجایی در سال ۱۴۰۵ بر مقدار کل آب ورودی و برداشت‌شده از این سد در فاز نخست در مدت پنجاه سال تقسیم شده است تا ضریب تخصیص به‌دست آید. در این سناریو  $1/23 \text{ m}^3$  آب /  $0/0333 \text{ kg}$  دی‌اکسید کربن تولید شده است که کلر با ۳۲ درصد در رتبه نخست و استفاده از لوله‌ها با ۲۵ درصد و مصرف برق با ۲۲ درصد در رتبه‌های بعد قرار گرفته است. در این سناریو، مصرف برق به‌ازای ۱ مترمکعب آب تصفیه‌شده به‌شدت کاهش یافته است که سبب کاهش کل آثار شده است و درصد اثر مصرف کلر و استفاده از لوله‌ها را افزایش می‌دهد. مهم‌ترین عوامل مؤثر در تولید گاز دی‌اکسید کربن در این سناریو و مقدار دی‌اکسید کربن تولیدشده بر اثر این عوامل در شکل ۷ نشان داده شده است.

به ترتیب با ۲۲، ۲۷/۹ و ۹/۵ درصد در رتبه‌های بعدی قرار دارد. هر چند در این سناریو به‌دلیل ارتفاع مناسب سد و تصفیه‌خانه، مصرف برق به‌شدت کاهش می‌یابد، با توجه به تولید برق از گاز طبیعی، آثار آن همچنان نقش اصلی را در این مرحله ایفا می‌کند. با توجه به اینکه تصفیه‌خانه ساخته‌شده به مدت پنجاه سال بهره‌برداری می‌شود و در این مدت مقدار آب تصفیه‌شده نسبت به مواد مصرف‌شده در مرحله ساخت زیاد است، میزان مواد تخصیص‌یافته به‌شدت کاهش و آثار مربوط به آن نیز کاهش می‌یابد. مواد مصرفی در مرحله ساخت تنها ۱۵ درصد آثار را به خود اختصاص داده است. البته، باید توجه داشت که به‌دلیل کاهش مصرف برق، مقدار کل دی‌اکسید کربن معادل تولیدی به‌شدت کاهش یافته و در نتیجه درصد آثار مواد مصرفی افزایش یافته است. مهم‌ترین عوامل مؤثر در تولید گاز دی‌اکسید کربن در این سناریو و مقدار دی‌اکسید کربن تولیدشده در اثر این عوامل در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷. مقدار دی‌اکسید کربن معادل عوامل مختلف در سناریوی نخست تا سوم

مقایسه به جای ۱/۲۳ مترمکعب تولید آب، مقدار کل آب تولیدشده در یک سال انتخاب شود، آثار این سناریو تنها ۱۸ درصد آثار تولید آب در سال ۱۳۹۳ خواهد بود.

سناریوی سوم نیز ۸۹ درصد کاهش اثر نسبت به مرحله برداشت آب سال ۱۳۹۳ نشان می‌دهد که علت آن مصرف پایین الکتریسیته (به دلیل قرارگرفتن سد شهید رجایی و تصفیه‌خانه آب در ارتفاع مناسب، همچنین وجود واحدهای مشترک) و تولید الکتریسیته به صورت برق‌آبی است. در این سناریو نیز، نسبت به سال ۱۳۹۳، تولید آب به میزان ۲۷ درصد افزایش یافته است که اگر مبنای مقایسه، مقدار کل آب تولیدی در سال باشد، آثار سناریوی دوم تنها ۱۴ درصد تولید آب در سال ۱۳۹۳ است. مقایسه مقدار دی‌اکسید کربن معادل تولیدشده در سه سناریو و حالت موجود در سال ۱۳۹۳ در شکل ۸ نشان داده شده است.

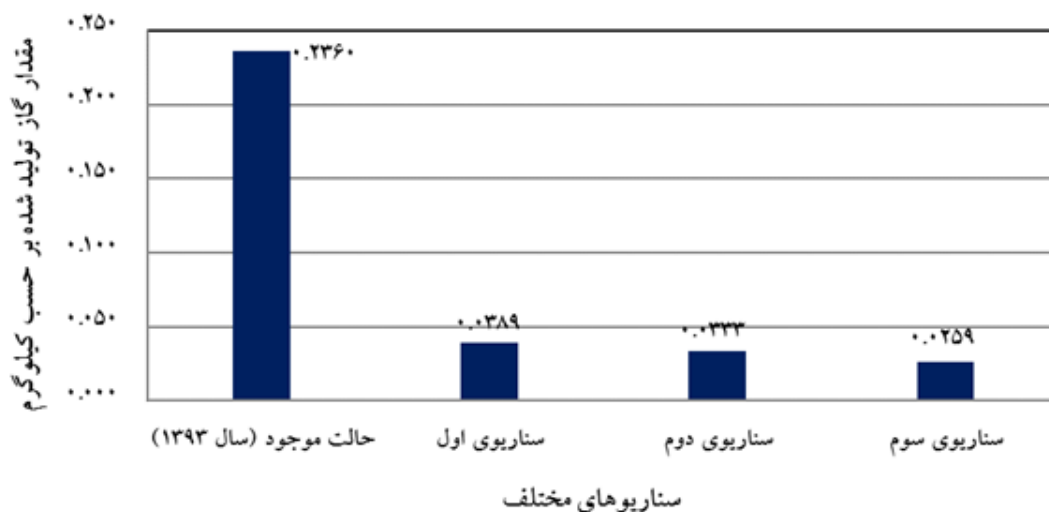
مقایسه سناریوی اول و دوم نشان می‌دهد که از نظر میزان دی‌اکسید کربن تولیدشده به ازای هر ۱/۲۳ مترمکعب آب، سناریوی دوم به دلیل وجود واحدهای مشترک و منجر به کاهش مصرف الکتریسیته، کاهش ۱۴ درصدی آثار نسبت به سناریوی اول را در پی داشته است. مقایسه سناریوی نخست و سوم نشان می‌دهد که سناریوی سوم به دلایلی چون وجود واحدهای مشترک و منجر به کاهش مصرف الکتریسیته و استفاده از الکتریسیته حاصل از نیروگاه برق‌آبی، تنها ۶۶ درصد آثار سناریوی نخست را در پی داشته است. مقایسه سناریوی دوم و سوم که تمامی مقادیر ورودی آن‌ها برابر است، نشان می‌دهد که چنانچه از نیروگاه برق‌آبی استفاده شود می‌توان آثار را حدود ۲۲ درصد کاهش داد.

در شبکه توزیع آب، با توجه به نبود لوله با جنس‌های مختلف در نرم‌افزار SimaPro، فرض شد که تمامی لوله‌ها از جنس پلی‌اتیلن است. برای تحلیل حساسیت و بررسی تأثیر این فرض بر نتایج، فرض شد که تمامی لوله‌ها از جنس PVC است. بنابراین، در مشخصات لوله‌ها، طبق جدول ۱۱ که فاصله حمل وارد محاسبات نشده است، تنها به تولید لوله‌ها توجه شده است.

سناریوی سوم همانند سناریوی دوم است، با این تفاوت که در این سناریو برق مصرفی تصفیه‌خانه از نوع برق‌آبی است. در این سناریو مقدار الکتریسیته موردنیاز برای تصفیه ۱۵۰۰ لیتر آب که برابر با حدود ۱۲۰۰ کیلووات ساعت در روز است، در نرم‌افزار SimaPro مدل شده است. در سناریوی سوم، مقدار اثر  $1/23 \text{ m}^3$  آب /  $\text{kg}$   $0/259$  دی‌اکسید کربن است که از این مقدار، ۴۱ درصد مربوط به مصرف پودر کلر، ۳۳ درصد مربوط به استفاده از لوله‌ها، ۱۴ درصد مربوط به استفاده از بتن در مرحله ساخت و ۶ درصد نیز مربوط به استفاده از میلگرد است که با توجه به استفاده از الکتریسیته تولیدشده در نیروگاه برق‌آبی، آثار آن مقدار ناچیزی است. در این سناریو به خوبی مشاهده می‌شود که با کاهش آثار مصرف برق (به دلیل کاهش مقدار مصرف و نوع تولید برق) که کاهش آثار کل را به دنبال دارد، درصد دیگر موارد افزایش می‌یابد. مهم‌ترین عوامل مؤثر در تولید گاز دی‌اکسید کربن در این سناریو و مقدار دی‌اکسید کربن تولیدشده بر اثر این عوامل در شکل ۷ نشان داده شده است.

طبق نتایج به دست آمده، تولید ۱/۲۳ مترمکعب آب در سناریوی نخست، آثار مربوط به مرحله برداشت و تصفیه آب را حدود ۸۴ درصد نسبت به حالت موجود در سال ۱۳۹۳ کاهش می‌دهد که عامل اصلی آن مصرف الکتریسیته است. سد شهید رجایی و تصفیه‌خانه آب کیاسر به دلیل قرارگرفتن در ارتفاع مناسب نسبت به منطقه شهری، میزان مصرف الکتریسیته را به میزان چشم‌گیری کاهش می‌دهد.

مقایسه سناریوی دوم با حالت موجود در سال ۱۳۹۳ (به ازای ۱/۲۳ مترمکعب آب برداشتی)، ۸۶ درصد کاهش اثر در این مرحله را نشان می‌دهد. دلیل این امر واقع شدن تصفیه‌خانه آب و سد شهید رجایی در ارتفاع مناسب نسبت به شهر ساری و وجود واحدهای مشترک است که موجب کاهش شدید مصرف برق شده است. البته، باید توجه داشت که در سناریوی دوم تولید آب به میزان ۲۷ درصد نسبت به سال ۱۳۹۳ افزایش یافته است. چنانچه مرجع



شکل ۸. مقایسه مقدار دی‌اکسید کربن معادل تولید شده در سناریوهای مختلف و حالت موجود در سال ۱۳۹۳

جدول ۱۱. مشخصات لوله استفاده شده در تحلیل حساسیت

قطر لوله PVC (mm)	طول لوله (km)	وزن واحد طول (kg)
۷۵	۱۱۱	۱/۸
۱۶۰	۴۵۷	۵
۳۱۵	۱۹۰	۱۹/۳
۴۰۰	۲۵	۳۱/۷

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، چرخه آب آشامیدنی شهر ساری در چهار مرحله برداشت و توزیع آب و جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب بررسی شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که مقدار دی‌اکسید کربن معادل تولید شده در کل چرخه آب  $۰/۳۹۲ \text{ m}^3$  آب /  $۰/۳۹۲ \text{ kg}$  دی‌اکسید کربن است که فاز برداشت آب با ۶۰ درصد، بیشترین تأثیر را در تولید گازهای گلخانه‌ای دارد. پس از آن، شبکه توزیع آب، تصفیه‌خانه فاضلاب و شبکه جمع‌آوری فاضلاب به ترتیب با ۲۰، ۱۲ و ۸ درصد از کل مقدار دی‌اکسید کربن تولید شده در رتبه‌های بعدی قرار دارد. همچنین، با بررسی تمامی عوامل مؤثر در تولید گازهای گلخانه‌ای، مشخص شد که میزان مصرف برق و نوع تولید آن بیشترین اثر را داشته است.

همچنین، سه سناریوی جایگزین با هدف تأمین قسمتی

محاسبات انجام شده نشان می‌دهد که به‌ازای ۱ مترمکعب آب مصرف شده،  $۲/۹۸$  گرم لوله پلی‌اتیلن در حالت اولیه و در این حالت،  $۳/۸۵$  گرم لوله PVC لوله استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که به‌ازای ۱ مترمکعب آب برداشت شده، اثر لوله‌های پلی‌اتیلن برابر با  $۰/۰۰۷۳۹$  و لوله‌های PVC برابر با  $۰/۰۱۲۴$  کیلوگرم دی‌اکسید کربن معادل است. به عبارت دیگر اثر لوله‌های PVC تقریباً ۶۸ درصد بیش از اثر لوله‌های پلی‌اتیلن است که سبب افزایش تولید گاز دی‌اکسید کربن به میزان ۶ درصد در شبکه توزیع آب و حدود  $۰/۱$  درصد در کل چرخه آب می‌شود. بنابراین، این فرض که تمامی لوله‌ها از جنس پلی‌اتیلن است در مقدار گاز دی‌اکسید کربن معادل کل چرخه آب آشامیدنی اثر قابل توجهی ندارد و فرضی منطقی به شمار می‌آید.



به‌صورت برق‌آبی تولید شود، در مرحله برداشت آب، میزان دی‌اکسید کربن تولیدشده به‌ازای  $1/23$  مترمکعب آب برداشتی ۸۹ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بهره‌برداری از تصفیه‌خانه آب کیاسر و استفاده از انرژی برق‌آبی به میزان زیادی در کاهش مصرف برق و تولید گازهای گلخانه‌ای مؤثر خواهد بود.

### یادداشت‌ها

#### 1. Life Cycle Assessment

یا کل آب مورد نیاز شهر ساری از سد شهید رجایی بررسی شد. طبق نتایج به‌دست آمده سناریوی نخست و دوم با تولید برق متعارف (به‌ترتیب با برداشت ۵۰۰ و ۱۵۰۰ لیتر در ثانیه آب از سد شهید رجایی و تصفیه آن)، علاوه‌بر تأمین آب با کیفیتی بالاتر، به‌ازای هر  $1/23$  مترمکعب آب برداشت‌شده، در مرحله برداشت آب، به‌ترتیب حدود ۸۴ و ۸۶ درصد کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای را به‌دنبال دارد. نتایج سناریوی سوم نیز نشان می‌دهد که چنانچه در سناریوی دوم، برق مصرفی

### منابع

- روغنی، ب. ۱۳۹۲. برآورد عملکرد شبکه فاضلاب بر پایه مهندسی ارزش و مباحث زیست‌محیطی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران.
- شرکت آب و فاضلاب شهری استان مازندران. ۱۳۹۴. آرشو فنی و بهره‌برداری.
- شرکت آب و فاضلاب شهری استان تهران. ۱۳۹۱. آرشو فنی و بهره‌برداری.
- فیضی ماسوله، م. ۱۳۹۲. ارائه الگویی جهت ارزیابی چرخه حیات تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران.
- Amores, M.J., Meneses, M., Pasqualino, J., Antón, A. and Castells, F. 2013 Environmental assessment of urban water cycle on Mediterranean conditions by LCA approach. *Journal of Cleaner Production*, 43: 84-92.
- Fine, P. and Hadas, E. 2012. Options to reduce greenhouse gas emissions during wastewater treatment for agricultural use. *Science of the Total Environment*, 416: 289-299.
- Flores-Alsina, X., Corominas, L., Snip, L. and Vanrolleghem, P.A. 2011. Including greenhouse gas emissions during benchmarking of wastewater treatment plant control strategies. *Water Research*, 45(16): 4700-4710.
- Friedrich, E., Pillay, S. and Buckley, C.A. 2009. Carbon footprint analysis for increasing water supply and sanitation in South Africa: a case study. *Journal of Cleaner Production*, 17(1): 1-12.
- Heijungs R., Guinée J., Huppes G., Lankreijer R.M., Udo de Haes H.A., Wegener Sleeswijk A., Ansems A.M.M., Eggels P.G., van Duin R. and de Goede H.P. 1992. Environmental life cycle assessment of products, Guide and backgrounds. CML, Leiden University, Leiden, The Netherlands.
- Herstein, L.M., Fillion, Y.R. and Hall, K.R. 2010. Evaluating the environmental impacts of water distribution systems by using EIO-LCA-based multiobjective optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 137(2): 162-172.
- Lemos, D., Dias, A.C., Gabarrell, X. and Arroja, L. 2013. Environmental assessment of an urban water system. *Journal of Cleaner Production*, 54: 157-165.
- Lundie, S. Peters, G.M. and Beavis, P.C. 2004. Life cycle assessment for sustainable metropolitan water systems planning. *Environmental Science and Technology*, 38(13): 3465-3473.
- Racoviceanu, A.I., Karney, B.W., Kennedy, C.A. and Colombo, A.F. 2007. Life-cycle energy use and greenhouse gas emissions inventory for water treatment systems. *Journal of Infrastructure Systems*, 13(4): 261-270.
- Sanjuan-Delmás, D., Petit-Boix, A., Gasol, C.M., Villalba, G., Suárez-Ojeda, M.E., Gabarrell, X. and Rieradevall, J. 2014. Environmental assessment of different pipelines for drinking water transport and distribution network in small to medium cities: a case from Betanzos, Spain. *Journal of Cleaner Production*, 66: 88-598.

Stokes, G. and Horvath, A. 2006. Life cycle energy assessment of alternative water supply systems. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(5): 335-343.

Suh, Y.J. and Rousseaux, P. 2002. An LCA of alternative wastewater sludge treatment scenarios. *Resources, Conservation and Recycling*, 35(3): 191-200.

Zhang, Z. and Wilson, F. 2000. Life cycle assessment of a sewage treatment plant in South East Asia. *Water and Environment Journal*, 14(1): 51-56.