۱۴۰۰، سال هشتم، شماره ۱، صفحات ۶۳ تا ۷۸
نشریه آب و توسعه پایدار

2021, Vol.8, No.1, Pages 63 to 78
Journal of Water and Sustainable Development

نوع مقاله: کاربردی

مروری بر کاربردهای انرژی خورشیدی در تأمین برق سامانه‌های آب و فاضلاب، با تأکید بر وضعیت موجود در آبفای ایران

امیررضا محمودی[۱*]، محمد سلطانی اصل[۲]، بهرام تقی‌زاده دربان[۳]

۱و۳- به ترتیب کارشناسی ارشد مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر و کارشناسی ارشد شیمی تجزیه، سازمان آب و فاضلاب استان خراسان رضوی، ایران. ۲- دکترای عمران-آب، استادیار موسسه آموزش عالی اسرار مشهد، ایران.

*(نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: a.r.mahmoudi@ut.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۳/۲۷
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۹

چکیده

کشور ایران، در یکی از مناطق گرم و خشک جهان، خاورمیانه، قرار گرفته است. چنین موقعیت جغرافیایی شرایط خاصی را به‌صورت هم‌زمان بر تأمین آب و برق مورد نیاز کشور تحمیل نموده است. تأسیسات آب و فاضلاب از زیرساخت‌های استراتژیک می‌باشد که نیاز به بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک در تأمین توان مورد نیاز آن به خوبی احساس می‌شود. این مقاله مروری بر تجربیات و فرآیندهای آب و فاضلاب که از انرژی خورشیدی خصوصاً برق فتوولتائیک بهره می‌گیرند خواهد داشت و در خلال آن به سیاست‌های داخل کشور در خصوص قراردادهای خرید تضمینی برق و تأثیر آن بر انگیزه سرمایه‌گذاری در این بخش توسط ارگان‌هایی همچون آبفا نگاهی انتقادی و تحلیلی دارد. در نهایت، وضعیت شرکت‌های آب و فاضلاب شهری و روستایی کشور از نظر میزان مصرف انرژی، میزان سرمایه‌گذاری در تولید برق خورشیدی و صرفه‌جویی به‌دست آمده از این بابت بررسی می‌شود. نتایج نشان داد، ۱۶۵۲ کیلووات پنل فتوولتائیک در بدنه شرکت‌های آب و فاضلاب شهری نصب شده که چیزی در حدود یک دهم درصد از مصرف سالانه برق در این بخش را پوشش می‌دهد. در بخش چالش‌ها، نکاتی مطرح خواهد شد که در صورت اجرایی شدن، می‌تواند بر گسترش سرمایه‌گذاری در زمینه تولید برق فتوولتائیک جهت مصرف تأسیسات آب و فاضلاب تأثیرگذار واقع شود. این چالش‌ها به دو گروه الف) دشواری تأمین مالی طرح‌های انرژی خورشیدی در سازمان آب و فاضلاب، و ب) عدم اطلاع‌رسانی کافی و صحیح و کمبود آموزش نیروی انسانی سازمان در خصوص کاربردها و مزایای انرژی‌های تجدیدپذیر قابل تقسیم می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: برق فتوولتائیک، انرژی خورشیدی، تصفیه آب و فاضلاب.

Article Type: Applied

Solar Power Applications in Water and Wastewater Treatment Systems: a Review with Focus on the Current Status of Iran's NWW Co.

A.R. Mahmoudi[1*], M. Soltani asl[2], B. Taghizadeh Darban[3]

1,3- MSc of Renewable Energy Engineering and MSc of Decomposition Chemistry, Khorasan Razavi Water and Wastewater Co., Iran. 2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Asrar Institute of Higher Education, Mashhad, Iran.

*(Corresponding Author Email: a.r.mahmoudi@ut.ac.ir)

Received: 16-06-2020
Accepted: 29-12-2020

Abstract

Iran is located in one of the hot and arid regions of the world, the Middle East. The geo-location imposes specific conditions for water and power supply, simultaneously. Water and wastewater treatment facilities are strategic infrastructures that need to be fed with more renewable power. While having a critical look at PPA contract structure and the way governmental policies has held back private sector from investing in power plants for water and wastewater treatment facilities, this article will review the specific processes that benefit from solar power. Ultimately, the power cost that Iran's National Water and Wastewater Engineering Co. (NWW) pays, the amount it has invested in solar PV power generation, and the economic savings of such measures in the recent year are reported. The results revealed that only 1652 kw of PV panels are installed by urban water and wastewater organizations, which is capable of producing roughly 0.1 percent of the power demand of its facilities. The challenges section boldens two major issues that addressing them will foster organizations such as NWW to invest in PV power plants for their high-consumption facilities. These challenges can be categorized as a) issues with funding renewable energy projects within NWW, and b) lack of knowledge about the matter by individuals within the organization as well as void of or poor training schedules by the system.

Keywords: Photovoltaic, Solar Energy, Water and Wastewater Treatment.

DOI: 10.22067/jwsd.v8i1.87348

مقدمه

انرژی‌های تجدیدپذیر می‌توانند سهم قابل توجهی در ایجاد دسترسی به انرژی و آب در سراسر جهان داشته باشند. در بسیاری از نقاط دنیا که از فقر انرژی رنج می‌برند، منابع قابل توجه انرژی تجدیدپذیر وجود دارد. سازمان ملل متحد در سال ۲۰۱۵ با معرفی برنامه‌ای ۱۵ ساله، کشورهای عضو را موظف به حرکت به سوی ۱۷ هدف در زمینه توسعه پایدار نمود. دسترسی به آب پاکیزه و انرژی ارزان و پایدار برای همگان از جمله این اهداف هستند که به شدت با یکدیگر آمیخته و مرتبط می‌باشند. با بررسی عمیق‌تر مشخص است که دسترسی به دیگر اهداف این برنامه (مانند ریشه‌کن نمودن فقر و گرسنگی و سلامت جسمی) تا حد زیادی به دستیابی به اهداف مربوط به آب و انرژی وابستگی دارد (United Nations Sustainable Development، ۲۰۱۹). طبق پیش‌بینی‌های انجام شده، تا سال ۲۰۴۰ حدود ۵۷۰۰ گیگاوات به ظرفیت تولید انرژی تجدیدپذیر در سراسر جهان اضافه خواهد شد که حدود ۷۰ درصد از کل گسترش ظرفیت تولید می‌باشد. نکته شایان توجه این است که بخش اعظم از ظرفیت‌های جدید تجدیدپذیر، نیروگاه‌های فتوولتائیک می‌باشند (IEA، ۲۰۱۹). علت توجه به تکنولوژی فتوولتائیک، خواص منحصر به‌فرد آن است، که در ادامه شرح داده شده است: الف) تولید برق فتوولتائیک هم‌اکنون ارزان‌ترین گزینه برای تولید برق منفصل از شبکه در نقاط دور افتاده می‌باشد، ب) تکنولوژی فتوولتائیک اصولاً بسیار ماژولار بوده و تولید برق به این روش در مقیاس‌های بسیار کوچک تا بسیار بزرگ میسر می‌باشد، ج) مدت زمان مورد نیاز جهت تکمیل پروژه‌های مزرعه خورشیدی در مقایسه با دیگر روش‌های تولید برق کمتر می‌باشد و این پروژه‌ها سریع‌تر به بهره‌برداری خواهند رسید، د) مصرف آب در سیستم‌های فتوولتائیک بسیار کم و قابل چشم‌پوشی است. بیشتر مصرف آب مربوط به فرایندهای تولید پنل خورشیدی است. درحالی‌که سیستم تولید برق از حرارت خورشیدی که روش دیگری برای بهره‌گیری از خورشید می‌باشد، ردپای آبی قابل توجهی از خود به جا می‌گذارد.

از نظر مقیاس و کاربرد سیستم‌های خورشیدی، سیستم‌های کوچک منفصل از شبکه می‌توانند همزمان برق مورد نیاز یک خانوار و انرژی لازم برای تأمین آب آشامیدنی را تأمین کنند. درحالی‌که در سمت دیگر این طیف، استفاده از برق تجدیدپذیر در تأسیسات مرکزی تصفیه آب و فاضلاب در شهرهای بزرگ نیز با موفقیت به انجام رسیده است. این موضوع اهمیت زیادی دارد؛ زیرا ۴٪ از برق تولیدی در ایالات متحده و همچنین در کشورهای پیشرفته اروپایی در تصفیه آب و فاضلاب و انتقال آب مصرف می‌شود (Energy Efficiency in Water and Wastewater Facilities، ۲۰۱۳). متاسفانه آمار صریح و رسمی در این زمینه در ایران وجود ندارد. بنابر اظهارات معاون آموزش و بهینه‌سازی سابا، مصرف برق در صنعت آب و فاضلاب کشور، ۲٪ از کل مصرف برق در کشور می‌باشد (ایلنا، ۱۳۹۴). اما بررسی دقیق آمار ارائه شده توسط مرکز آمار ایران در زمینه مصرف برق در کشور و مقایسه آن با جداول ارائه شده توسط مرکز مدیریت مصرف انرژی سازمان آب و فاضلاب کشور، نشان می‌دهد این میزان بیشتر بوده و حدود ۳/۳٪ از مصرف برق در کشور در صنعت آب و فاضلاب رخ می‌دهد (درگاه ملی آمار ۱۳۹۵؛ دفتر انرژی سازمان آب و فاضلاب کشور، ۱۳۹۸ الف و ب). همچنین در کشور ما مناطق دورافتاده زیادی وجود دارند که از دسترسی به برق شبکه و آب قابل آشامیدن محروم هستند. این نکته، می‌تواند یادآور اهمیت موضوع برای وزارت نیرو در به‌کارگیری سیستم‌های مستقل آب رسانی و تصفیه فاضلاب جهت تأمین آب کشاورزی در این مناطق باشد. چنانچه این هدف در آینده مد نظر مسئولین قرار گیرد، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، خصوصا انرژی خورشید می‌تواند مناسب‌ترین گزینه از نظر اقتصادی و جنبه‌های محیط زیستی باشد. مزیت مختص تکنولوژی فتوولتائیک این است که ماهیتی بسیار ماژولار دارد و این باعث می‌شود گستره کاربردهای آن در مسائل مربوط به آب و فاضلاب از سیستم‌های کوچک خانگی تا سیستم‌هایی در مقیاس یک روستا تا سیستم‌هایی به بزرگی تأسیسات آب‌رسانی یک شهر را شامل شود.

باتوجه‌به مطالب بیان شده و با در نظر گرفتن سهم قابل توجهی از برق تولیدی کشور که توسط سامانه‌های آب و فاضلاب به مصرف می‌رسد، اهمیت موضوع از دیدگاه مدیریت مصرف انرژی در کشور مشخص می‌شود. همچنین با مدیریت این بخش از مصرف برق و سوق دادن آن به سمت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، مزایای محیط زیستی از قبیل کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای محقق خواهد شد. هدف از این پژوهش، بررسی کاربردهای انرژی خورشیدی در تأمین توان سامانه‌های آب و فاضلاب، مرور تجربیات موفق در این زمینه در جهان، مرور پژوهش‌های انجام شده در این زمینه و بررسی وضعیت موجود از نظر مصرف انرژی و حجم سرمایه‌گذاری در تأمین برق خورشیدی در صنعت آب و فاضلاب کشور می‌باشد. داده‌های موجود در رابطه با شرکت‌های آب و فاضلاب شهری و روستایی استان خراسان رضوی و شهر مشهد به‌عنوان واحدهای کوچکتری زیرمجموعه صنعت آب و فاضلاب کل کشور به‌صورت مجزا بیان شده است. در بخش‌های سوم و چهارم این مقاله، کاربردهای انرژی خورشیدی در سامانه‌های تأمین آب شرب و کشاورزی و در سامانه‌های تصفیه فاضلاب به‌صورت جداگانه بحث و بررسی شده است. در پایان براساس مطالبی که در بخش‌های نخست ارائه شد، مهمترین چالش‌هایی که پیش‌روی به‌کارگیری انرژی خورشید در تأمین حداقل بخشی از برق مصرفی سامانه‌های آب و فاضلاب کشور می‌باشد عنوان شده و پیشنهاداتی جهت رفع این معضلات ارائه شده است.

روش تحقیق

این مقاله مروری برحسب هدف، در گروه مقالات مروری تبیینی انتقادی قرار می‌گیرد. چراکه بر استنتاج و تفسیر نتایج متمرکز بوده

و هدف آن آشکار ساختن پتانسیل‌های کابرد انرژی خورشیدی در صنعت آب و فاضلاب و پر رنگ نمودن نقاط ضعف در این راستا می‌باشد. دامنه پژوهش، این مقاله کاربردهای انرژی خورشیدی در سامانه‌های آب و فاضلاب را بررسی کرده و باتوجه‌به نیاز اولیه انرژی در این صنعت که از طریق برق تأمین می‌شود، سعی شده بیشتر بر تولید برق فتوولتائیک تاکید شود. از نظر نوع سازماندهی مطالب، این مقاله از روش مفهومی (غیر تاریخی) تبعیت می‌کند.

کاربرد انرژی خورشیدی در سامانه‌های تأمین آب شرب و کشاورزی

اهم راهکارهای تأمین آب شرب بااستفاده‌از سیستم فتوولتائیک را می‌توان در موارد ذیل خلاصه نمود: الف) فرایند اسمز معکوس که در مرحله کاملاً تجاری قرار داشته و در اکثر نقاط دنیا به فراوانی استفاده می‌شود. درحالی‌که فناوری‌های دیگر مانند الکترودیالیز توسط شرکت‌های بسیاری در حال بررسی است و احتمال می‌رود به زودی امکان کاربرد آن در نقاط دوردست و خشک با آب زیرزمینی شور قابلیت تجاری شدن داشته باشد. ب) سیستم دیگری که کاربرد آن در تأمین آب شرب با استفاده از انرژی خورشیدی جذابیت بالایی دارد، میکروب‌زدایی آب شرب می‌باشد که ترکیب تشعشع ماوراء بنفش با پنل‌های فتوولتائیک به‌صورت مستقل از شبکه برق به راحتی در دسترس می‌باشد. ج) پمپ خورشیدی برای آب‌رسانی مصارف آشامیدنی و کشاورزی در مناطق روستایی. برای پمپ‌های خورشیدی خصوصا تا ۵ کیلووات بازار خوبی وجود دارد، زیرا در این محدوده استفاده از پنل‌های خورشیدی بسیار موثر می‌باشد. این سیستم‌ها بسته به نیاز موردی، هم به‌صورت مستقل از شبکه و با استفاده از منبع ذخیره برق باتری و هم به‌صورت هیبرید شبکه نصب می‌شوند (PV solutions for supplying drinking water، ۲۰۱۹).

تأمین آب شرب بااستفاده‌از آب شیرین کن‌های اسمزاسمز معکوس بسیار متداول است. تعداد تأسیسات نصب شده در ۳۰ سال گذشته به‌صورت تصاعدی افزایش یافته، اما نکته اصلی این است که تأمین آب به روش اسمزاسمز معکوس بیشترین مصرف انرژی از بین روش‌های مختلف را طلب می‌کند: ۳/۵ تا ۸ کیلووات ساعت بر متر مکعب (Olsson، ۲۰۱۵). اهمیت استفاده از برق خورشیدی در تأمین انرژی مورد نیاز آب شیرین کن‌ها، حتی در کشور پر نفتی همچون عربستان سعودی (جایی‌که طرح به‌کارگیری آب شیرین‌کن خورشیدی توسط پادشاه ملک عبدالله از سال ۲۰۱۰ کلید خورده) به خوبی درک شده است (Renewable Energy in the Water, Energy and Food Nexus، ۲۰۱۵). موارد زیادی از کاربرد آب شیرین کن در ترکیب با پنل فتوولتائیک در کشورهای در حال توسعه گزارش شده است (Ahmadi و همکاران، ۲۰۲۰؛ Azevedo، ۲۰۱۴؛ Shouman و همکاران، ۲۰۱۵). در بسیاری از نقاط جهان که آب زیرزمینی شور می‌باشد (غلظت کمتر از ۱۰۰۰۰ میلی گرم بر لیتر)، تابش خورشید بسیار زیاد است. ماهیت تولید برق خورشیدی منقطع می‌باشد؛ اگرچه در اکثر نقاطی که با کمبود آب مواجه هستند، ساعات پیک تولید برق خورشیدی به خوبی با ساعات پیک مصرف آب منطبق هستند، اما همچنان مهم است که تکنولوژی باتری خورشیدی به حدی گسترش یابد که بتوان با هزینه کمتری از برق خورشیدی در ساعات شب برای تصفیه آب استفاده نمود. این موضوع می‌تواند به استقبال بیشتر از سیستم‌های خورشیدی منجر شود. روش دیگری برای ذخیره‌سازی برق مازاد در طول روز، تولید آب آشامیدنی یا آب مناسب کشاورزی و ذخیره‌سازی آن در مخزن می‌باشد. استفاده یا عدم استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، به شرایط منطقه مورد نظر از نظر انرژی در دسترس و خصوصا از نظر توان مالی ساکنان آن بستگی دارد. در کشورهای فقیرتر، اینکه برق در تمام ساعات شبانه روز در دسترس نباشد بیشتر پذیرفته می‌شود. درحالی‌که در کشورهای پیشرفته و غنی‌تر، تمایل برای پرداخت هزینه بیشتر در ازای رفاه بیشتر وجود دارد. برای درک بهتر این موضوع می‌توان به یک نمونه تجاری موفق در دریای کارائیب اشاره کرد تا هزینه‌هایی که کشورهای پیشرفته برای تأمین آب شرب پرداخت می‌کنند، آشنا شد. این پروژه با مقیاس متوسط توسط شرکت معتبر MEECO در جزیره دورافتاده جامبی بی آیلند[1] در دریای کارائیب انجام شده است. این جزیره یک مقصد گردشگری لوکس می‌باشد که مشکلات اصلی آن تأمین برق و تأمین آب آشامیدنی است. شرکت مذکور با ترکیب پنل‌های فتوولتائیک، آب شیرین‌کن اسمز معکوس و باتری‌های خورشیدی به خوبی توانسته است بر این مشکلات غلبه نماید و اکنون این جزیره به مقصدی عالی برای خرید ملک و گردشگری تبدیل شده است. یک نیروگاه فتوولتائیک با ظرفیت ۵۱ کیلووات که با سازه ثابت ایجاد شده، برق مورد نیاز پمپ‌های تصفیه آب را تأمین نموده و مازاد تولید برق در باتری ذخیره می‌شود. سیستم پایش و مدیریت مصرف برق تعبیه شده می‌تواند در زمان مناسب از ذخیره برق باتری جهت مصارف خانگی یا تأمین برق آب شیرین کن استفاده نماید. مجموع برق تولیدی در سال توسط این سامانه بالغ بر ۷۶ مگاوات ساعت تخمین زده شده است (Solar energy for water meeco | treatment، ۲۰۱۹). از دیگر فعالیت‌های تجاری بزرگ بر پایه بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر در تصفیه‌خانه‌های آب می‌توان به طرح بزرگ شرکت ACCIONA اشاره نمود. این شرکت بین‌المللی که در بیش از ۴۰ کشور حضور فعال دارد، در پروژه با نام Renewat در شهر مورسیا در جنوب شرقی اسپانیا، جایی‌که منابع قابل توجه انرژی خورشید و باد در دسترس می‌باشد، توانسته بخش قابل توجهی از برق مورد نیاز ایستگاه تصفیه آب شهر نیم میلیون نفری را از انرژی‌های خورشید و باد تأمین نماید. در این پروژه نه تنها تولید برق تجدیدپذیر مد نظر بوده، بلکه با ایجاد یک سیستم مدیریت هوشمند، از یک طرف تولید برق تجدیدپذیر و از طرفی میزان مصرف آن توسط فرآیندها را در حالت بهینه نگه می‌دارد. نتیجه چنین فرآیند پیچیده و کاملی، کاهش ۳۰ درصدی مصرف برق تأسیسات هدف گزارش شده است. در نیروگاه پایلوت مذکور، ۱۴۳۰۰۰ کیلووات ساعت در سال برق تجدیدپذیر تولید می‌شود که معادل مصرف برق ۴۰ خانوار می‌باشد. همچنین از آزادسازی ۱۱۰ تن دی اکسید کربن در سال جلوگیری شده است. از نظر مالی، هزینه تصفیه آب ۲۴ درصد

کاهش داشته و از ۰/۴ یورو به ۰/۳ یورو به ازای هر متر مکعب آب رسیده است (Water treatment plants powered by renewable energies، ۲۰۲۰).

در سال ۲۰۱۵، سازمان انرژی‌های نو استرالیا (ARENA) تصمیم گرفت بررسی جامعی در زمینه فرصت‌های موجود در صنعت آب این کشور انجام دهد تا اولویت‌هایی که نیاز به گسترش دانش یا تأمین مالی دارند مشخص شده و قادر باشند سریعا به گسترش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در آن صنعت انرژی‌بر بپردازند. به‌این‌ترتیب، شرکت مشاوران نام آشنای BECA به مطالعه موارد پیشین، نظرسنجی از اهالی صنعت جهت شناخت دیدگاه‌ها و میزان نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر و مهمتر از همه پیاده‌سازی تحلیل چند معیاره جهت مشخص نمودن اولویت‌های سرمایه‌گذاری پرداخت (BECA، ۲۰۱۵)، و در نهایت گزارش جامعی تهیه و منتشر نمود. در این گزارش فرصت‌های به‌کارگیری انواع انرژی‌های تجدیدپذیر در سراسر صنعت آب آن کشور بررسی شد. مهمترین فاکتورهایی که در آن پژوهش به‌منظور رتبه‌بندی اولویت‌ها استفاده شده، می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود: الف) مقیاس محتمل برای به‌کارگیری انرژی خورشیدی در آینده (سال ۲۰۴۰)، ب) پتانسیل رشد آن، ج) توانایی سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر استرالیا در ترغیب سرمایه‌گذاری در آن زمینه به‌خصوص و د) میزان تطابق با اولویت‌های موجود در آن شرکت در بازه زمانی تحقیق. باتوجه‌به مطالب مطرح شده، واضح است پژوهش مذکور جامع و مانع بوده و از نظر مبانی نظری و روش تحقیق معتبر می‌باشد. بنابراین بررسی نتایج حاصل از آن می‌تواند از جهت تطابق با شرایط کشور بسیار مفید باشد. در نتیجه آن پژوهش، اولویت‌های اصلی ذیل برای سرمایه‌گذاری و گسترش دانش مشخص شد: ۱) کاربرد انرژی‌های تجدیدپذیر در پمپاژ آب و آبیاری، ۲) تکنولوژی ذخیره‌سازی و مدیریت تقاضا. در گزارش مذکور، علاوه‌بر اشاره به پمپ‌های آب کشاورزی به‌عنوان یک مصرف کننده بزرگ برق، به مصرف بالای برق پمپاژ در شبکه آب شهری تاکید شده است. به گونه‌ای که این پمپ‌ها بخش اعظم انرژی شبکه آبرسانی را مصرف می‌کنند. بهترین مکان‌ها برای کاربرد برق خورشیدی جایی است که تعرفه‌های برق بیشتر باشد و در نقاطی که برق شبکه سراسری در دسترس نباشد. در راستای افزایش نفوذ پمپاژ خورشیدی در سامانه‌های آب‌رسانی در نقاط خارج از شبکه سراسری برق یا در حاشیه‌های آن، توصیه شده که بر گسترش فناوری‌های ذخیره‌سازی آب و برق تمرکز شود. علاوه‌بر تولید باتری‌های خورشیدی ارزان‌تر و مقاوم‌تر، می‌توان به این نکته توجه داشت که می‌توان در ساعات فراوانی نور خورشید، مازاد برق را جهت پمپاژ آب به مخازنی در ارتفاع و ذخیره‌سازی جهت ساعات شب مصرف نمود. به‌این‌ترتیب نیاز به استفاده از باتری‌های پر هزینه از بین می‌رود. این قابلیت خاص سیستم‌های آب‌رسانی را می‌توان در حالتی که از برق شبکه استفاده می‌شود نیز به‌کار گرفت تا درساعات غیر پیک که تعرفه برق کمتر است، پمپاژ آب به مخزن انجام و در ساعات اوج مصرف برق که تعرفه‌ها حداکثر هستند پمپ‌ها خاموش شوند.

استفاده از انرژی خورشیدی در تأمین برق تأسیسات تصفیه آب (اسمز) از چند جهت مزیت دارد. در نقاط دوردست کویری که کیفیت آب زیرسطحی معمولا پایین است، برق در دسترس نیست یا انتقال آن هزینه‌بر می‌باشد و همزمان تابش خورشید زیاد است. حداکثر شدت تابش خورشید با پیک مصرف آب در تابستان همزمان است. همچنین خرید برق از شبکه برای تصفیه آب در ساعات ظهر در مناطق کویری باعث افزایش شدید هزینه منظور شده در قبوض برق می‌شود، زیرا در ساعات اوج گرما که با ساعات اوج مصرف برق همخوانی دارد، تعرفه برق گران‌تر خواهد بود. شایان ذکر است مطالعه‌ای در استرالیا این مطلب را تایید می نماید (Richards و Schäfer، ۲۰۰۹). مطالعه‌ای در امریکا نشان می‌دهد برای ایجاد استقلال از شبکه برق با تأمین برق خورشیدی برای ایستگاه تصفیه آب چاه که به مصرف شهروندان می‌رسد، برای تصفیه تقریبا نیم مترمکعب آب چاه در ثانیه می‌توان ۱/۵ مگاوات پنل و ۳۰ مگاوات ساعت باتری ایجاد نمود تا ارزش خالص فعلی[۲] مثبت و هزینه تراز شده انرژی[۳] برابر با ۳/۱ سنت بر کیلووات ساعت داشته باشد. همچنین میزان کاهش تولید کربن دی اکسید در اثر این انتخاب قابل توجه خواهد بود که در کشورهای پیشرفته نکته حائز اهمیتی می‌باشد که در بهر وری اقتصادی طرح نیز تأثیرگذار است (Bukhary و همکاران، ۲۰۲۰). در مناطقی که برق به راحتی در دسترس نیست و منابع آب نیز فاصله زیادی دارد، معمولا آب با استفاده از تانکر به مناطق مسکونی حمل می‌شود که گزینه گرانی است و به دلایل مختلفی در برخی از برهه‌های زمانی قطع می‌شود. در این حالت، می‌توان از پمپاژ فتوولتائیک استفاده نمود. از میان مزایای سیستم پمپاژ آب فتوولتائیک، بر چهار نکته معمولا تاکید بیشتری وجود دارد: ۱) کارکرد خودکار بدون نیاز به اوپراتور ۲) هزینه نگهداری پایین ۳) نصب آسان ۴) عمر طولانی. حتی در مقالات تایید شده که پمپاژ فتوولتائیک در مقایسه با پمپاژ با استفاده از ژنراتور دیزل، هم در مناطق شهری و هم در مناطق روستایی، از نظر اقتصادی ممکن می‌باشد (Jones و Olsson، ۲۰۱۷). هندوستان از نظر میزان سوبسید پرداخت شده از طرف دولت روی برق شبکه بسیار به ایران شباهت دارد. کشاورزان تنها ۱۳٪ از قیمت واقعی برق را پرداخت می‌کنند (Reforming Energy Subsidies Could Curb India's Water Stress، ۲۰۱۹). درحالی‌که ۲۶ میلیون عدد پمپ کشاورزی در هندوستان وجود دارد که ۱۲ میلیون از آنها با برق شبکه کار می‌کنند (Renewable Energy in the Water, Energy & Food Nexus، ۲۰۱۵). هزینه‌های سوبسیدی دولت برای برق کشاورزی کمرشکن شده و از طرفی فروکش نمودن تدریجی سطح آب‌های زیرزمینی، مصرف برق را روز به روز افزایش داده و اوضاع هر روز وخیم تر می‌شود. بنابراین هندوستان اعلام کرده قصد دارد بسیاری از ۲۶ میلیون پمپ آب کشاورزی را با پمپ خورشیدی جایگزین نماید (Shim، ۲۰۱۷). پیش‌بینی می‌شود این سیاست‌گذاری باعث افزایش برداشت از منابع آب زیرزمینی شود. به‌این‌منظور کشاورزانی که برای تهیه پمپ خورشیدی از اعتبارات دولتی استفاده می‌کنند متعهد می‌شوند حتماً از سیستم آبیاری قطره‌ای بهره‌گیری کنند. همچنین در

آفریقا بیش از ۳۰۰ میلیون نفر از دسترسی به آب مرغوب آشامیدنی محروم هستند و بیش از ۴۰ درصد خانوارهای روستایی لوله‌کشی آب ندارند. همچنین بسیاری نقاط قاره آفریقا دچار فقر انرژی هستند- به‌این معنی که شبکه برق‌رسانی وجود ندارد یا برق‌رسانی به‌صورت مقطعی انجام می‌شود. درحالی‌که تابش خورشید در پایتخت کشورهای افریقایی تا دو برابر کشوری مانند آلمان نیز گزارش شده است (Irena، ۲۰۱۶). به‌این‌ترتیب، نصب پنل‌های خورشیدی در آفریقا به سرعت در حال گسترش می‌باشد. سیستم‌های آب‌رسانی خورشیدی فراوانی با حمایت بانک پیشرفت آفریقا در این قاره ساخته شده که بیش از ۱۲۵۰ پمپ دستی چاه‌های آب را از رده خارج نموده است. جاییکه مردم برای دریافت آب صف می‌کشیدند. در داخل کشور، اگرچه سهم بخش کشاورزی از مجموع مصرف انرژی کشور ناچیز بوده و هست، اما آمارها نشان می‌دهد تقاضا برای حامل‌های نفتی کاهش یافته و مصرف برق و گاز طبیعی به شدت افزایش داشته است. میزان مصرف برق همچنین بیشتر از نفت گاز و تقریبا دو برابر گاز طبیعی است. بیشترین مصرف مستقیم برق جهت موتور پمپ چاه‌های کشاورزی است. طبق گزارش مرکز پژوهش‌های وزارت جهاد کشاورزی، در ایران در پی اجرای سیاست‌های کلان کشور در راستای برق‌دار نمودن چاه‌های آب کشاورزی، مصرف برق کشاورزی رشد وسیعی را تجربه نمود. در سال ۱۳۹۴، ۲۴۵,۳ هزار حلقه چاه کشاورزی به پمپ‌های برقی مجهز شدند که متوسط دیماند آنها ۳۵ کیلووات بوده است. این مهم اهمیت حرکت به سمت تأمین برق خورشیدی برای چاه‌ها را نشان می‌دهد. براساس گفته‌های مجری طرح برق‌دار کردن چاه‌های کشاورزی در سازمان بهینه‌سازی مصرف سوخت، برق‌دار کردن ۸۴ هزار حلقه چاه کشاورزی جدید به تدریج در دستور کار وزارت نیرو قرار گرفته که عملیات اجرایی آن در سال ۱۳۹۹ آغاز خواهد شد (طرح برق‌دار کردن چاه‌های کشاورزی در سال ۹۹ اجرایی می‌شود ۱۳۹۸). درحالی‌که این طرح با هدف کاهش مصرف سوخت در ژنراتورهای دیزل صورت می‌پذیرد، نگرانی‌ها از افزایش مصرف برق و افزایش غیر مستقیم مصرف سوخت در نیروگاه‌ها، افزایش پیدا می‌کند. شایان ذکر است در سال ۱۳۹۶، ۲۰ درصد از کل مصرف برق استان خراسان رضوی توسط چاه‌های کشاورزی انجام شده است (مصرف ۲۰ درصد برق خراسان رضوی توسط چاه‌های آب کشاورزی ۱۳۹۶).

در ایران پژوهش‌هایی در خصوص به‌کارگیری انرژی خورشیدی در سامانه‌های آب‌رسانی و تصفیه آب انجام شده است. حسینی بیدار و متین پور (۱۳۹۷) با امکان‌سنجی استفاده از پمپ‌های خورشیدی در صنعت آبفا به این نتیجه رسیدند که در چاه‌های عمیق شهر ازندریان استان همدان، استفاده از پمپ‌های خورشیدی از لحاظ فنی و اقتصادی میسر نمی‌باشد. فاضل (۱۳۹۱)، استفاده از برق خورشیدی برای سیستم پمپاژ ایستگاه ائل گلی تبریز را پیشنهاد نموده است. وی در این پژوهش سیستمی به‌منظور ردیابی نقطه حداکثر توان[۴] پیشنهاد نمود، که در شرایط تغییر ناگهانی آب و هوا عملکرد بالایی داشت و توان فتوولتائیک را در حداکثر مقدار خود در هر شرایط آب و هوایی نگاه می‌دارد. باتوجه‌به نیاز آبفای استان خراسان شمالی، سلیمانی و مهدوی چابک (۱۳۹۷) به امکان‌سنجی و شبیه‌سازی استفاده از هیبرید انرژی خورشیدی و برقابی به‌منظور تأمین توان سیستم‌های پمپاژ آب و تصفیه‌خانه‌های استان پرداختند. مورد مطالعه ایشان ایستگاه پمپاژ و تصفیه‌خانه آب سد شیرین دره بجنورد بود.

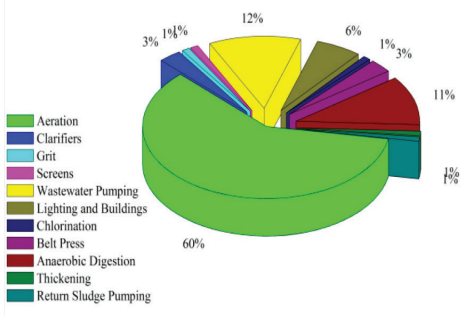
به طور خلاصه، مهمترین کاربردهای انرژی خورشیدی در رابطه با سامانه‌های تأمین آب شرب را می‌توان به‌این صورت بیان نمود: الف) تأمین برق مورد نیاز در آب شیرین‌کن‌های اسمز معکوس، ب) تأمین برق مورد نیاز برای میکروب‌زدایی آب به‌وسیله تکنولوژی اشعه ماوراء بنفش و ج) تأمین برق پمپ‌های شبکه و پمپ‌های کشاورزی. بزرگترین عاملی که می‌تواند به گسترش روز افزون استفاده از انرژی خورشیدی و اقبال عمومی به این موضوع کمک نماید، بهبود روش‌های ذخیره‌سازی انرژی خورشید به‌منظور استفاده از آن در ساعات شب می‌باشد. این مهم از طریق تولید باتری‌های مناسب‌تر و بهبود روش‌های ذخیره آب ممکن می‌باشد. البته مسائل اجتماعی و فرهنگی و همچنین سطح برخورداری مالی منطقه نیز در نحوه به‌کارگیری این سیستم‌ها موثر می‌باشد. در بخش کشاورزی، پمپاژ آب برق زیادی مصرف می‌نماید که این مساله با اجرای طرح برق‌دار کردن چاه‌های کشاورزی و افزایش دیماند مصرفی این چاه‌ها پیچیده‌تر خواهد شد. در زمینه امکان به‌کارگیری انرژی خورشیدی در تأمین توان این بخش مطالعات محدودی در کشور انجام شده است.

کاربرد انرژی خورشیدی در سامانه‌های تصفیه فاضلاب

در رابطه با امکان کاربرد انرژی‌های تجدیدپذیر و خصوصا انرژی خورشیدی در تأسیسات تصفیه فاضلاب، باید ابتدا با نحوه مصرف انرژی در فرایندهای مختلف تصفیه آشنا شد و سپس میزان فراگیری فرایندهای مختلف را در شبکه تصفیه فاضلاب ایران مد نظر قرار داد. به‌طورکلی مصرف انرژی در تأسیسات تصفیه فاضلاب را می‌توان به دو بخش مستقیم و غیر مستقیم تقسیم نمود. مصرف مستقیم شامل برق مورد نیاز برای کارکرد پمپ‌ها، دمنده‌های هوا و غیره است. مصرف غیر مستقیم شامل مواد شیمیایی است که در حذف فسفر و آبگیری از لجن کاربرد دارد و مقدار آن نسبتا ناچیز است. در فرآیندهای ثانویه تصفیه فاضلاب، مصرف برق پمپ فاضلاب حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد از کل مصرف را شامل می‌شود، تصفیه بیولوژیکی حدود ۵۰ تا ۷۰ درصد، فرآوری لجن و دور ریختن آن ۱۰ تا ۲۵ درصد و ترکیب این سه فرآیند بیش از ۷۰ درصد مصرف انرژی را در بر می‌گیرد (Guo و همکاران، ۲۰۱۹). شکل (۱) مصرف انرژی در یک سیستم مرسوم لجن فعال را نشان می‌دهد. جاییکه عملیات هوادهی بخش اعظم توان را مصرف می‌نماید (۶۰٪). در سیستم‌های امروزی با افزایش نگرانی‌های محیط‌زیستی، استفاده از فیلتر شنی و فیلتر ماورا بنفش افزایش یافته است. بنابراین می‌توان ادعا نمود بیشترین پتانسیل جهت کاهش مصرف انرژی در پمپ‌های لیفت فاضلاب و عملیات هوادهی پنهان می‌باشد.

براساس اطلاعات به‌دست آمده از مرکز آمار ایران، در سال ۱۳۹۵، ۷۴

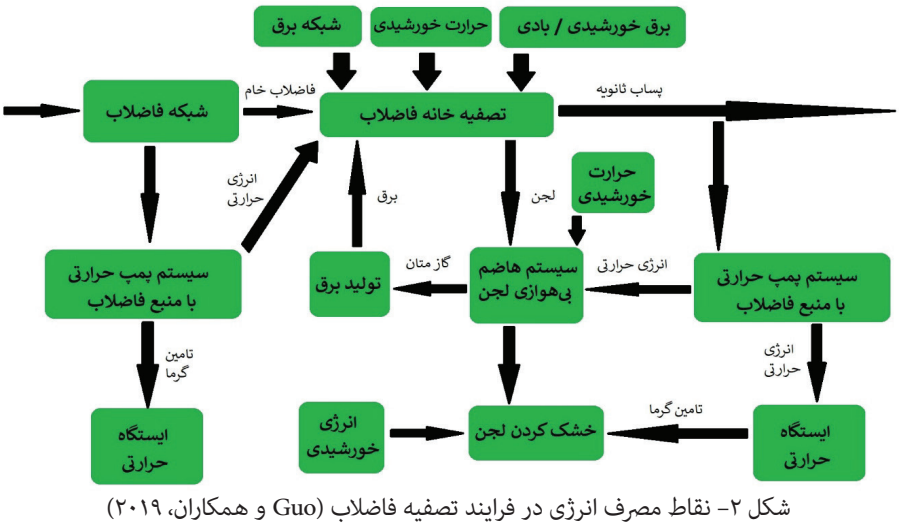
٪ از جمعیت ایران شهرنشین بودند و براساس پیش‌بینی‌های انجام شده این عدد تا ۸۰ ٪ در سال ۱۴۱۵ افزایش خواهد یافت که باتوجه‌به افزایش روز افزون جمعیت کل کشور، به معنی افزایش ۱۷ میلیون نفری جمعیت شهری از سال ۱۳۹۵ تا سال ۱۴۱۵ می‌باشد (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۹). همچنین، انتظار می‌رود در سال ۲۰۵۰ میلادی (۱۴۲۹ شمسی)، نسبت جمعیت شهرنشین در ایران به ۸۶ درصد افزایش یابد (معاونت بررسی های اقتصادی اتاق بازرگانی تهران،۱۳۹۷). از دیدگاه سازمان‌های آب و فاضلاب، تمامی این آمار به معنی اهمیت روز افزون گسترش شبکه زیرساخت‌ها و به‌ویژه دسترسی به شبکه فاضلاب شهری می‌باشد. درحالی‌کهبراساس گفته‌های وزیر نیرو در سال ۱۳۹۸ تنها ۵۱٪ از جمعیت شهری کشور تحت پوشش شبکه فاضلاب بوده است (ایرنا، ۱۳۹۸). شایان ذکر است، این رقم نشان می‌دهد رشد صورت گرفته نسبت رشد پیش‌بینی شده در گذشته به میزان قابل توجهی کمتر بوده (مسافری و همکاران، ۱۳۸۱) و بیان‌کننده نیاز به رشد فزاینده در زمینه گسترش شبکه فاضلاب می‌باشد.



شکل ۱- مصرف انرژی در بخش‌های مختلف یک سامانه تصفیه فاضلاب به روش لجن فعال (Guo و همکاران، ۲۰۱۹)

فهیمی‌نیا و همکاران (۱۳۹۰) موانعی را که بر سر راه گسترش شبکه‌های جمع‌آوری و تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در کشور وجود دارد بررسی نموده که در میان آن‌ها عواملی همچون بافت نامناسب شهر و کم عرضی معابر عمومی مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد در احداث تصفیه‌خانه اولویت نزدیک بودن به شهر در نظر گرفته می‌شود، یکی از دلایل آن تسهیل امر انتقال برق تا سایت تصفیه‌خانه می‌باشد. درصورتی‌که از انرژی‌های تجدیدپذیر به‌منظور تأمین برق تصفیه‌خانه‌ها به‌صورت مستقل از شبکه استفاده شود، امکان احداث تصفیه‌خانه در نقاط مناسب‌تر فراهم می‌شود. از نظر فرایندی، در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری احداث شده در کشور تا سال ۱۳۹۵، از حدود ۱۸۳ تصفیه‌خانه، تقریباً ۸۰ تصفیه‌خانه براساس فرایند لجن فعال و اصلاح‌شده آن، ۴۶ تصفیه‌خانه براساس برکه تثبیت، ۴۲ تصفیه‌خانه براساس فرایند لاگون هوادهی، ۱۳ تصفیه‌خانه براساس فرایندSBR و ۲ تصفیه‌خانه براساس وتلند[5] (تالاب) می‌باشد (وضعیت تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری موجود در کشور،۱۳۹۷).

باتوجه‌به فعالیت تعداد زیاد ایستگاه‌های تصفیه فاضلاب، مشکل دفع لجن این ایستگاه‌ها شدیدتر شده است. به‌منظور کاهش هزینه دفع لجن، باید ابتدا حجم آن را طی فرایند آب‌گیری کاهش داد. حتی پس از دستیابی به حداکثر کاهش محتوی آب لجن در فرایند آبگیری مکانیکی (۵۰ تا ۶۰ درصد ماده خشک)، می‌توان با استفاده از تکنولوژی خشک کن حرارتی در ترکیب با فرایند احتراق باز هم حجم لجن را کاهش داد (Arashiro و همکاران،۲۰۱۸). از انرژی خورشیدی، به‌عنوان فراوان‌ترین منبع انرژی تجدیدپذیر، می‌توان در فرایند تصفیه فاضلاب بهره گرفت. شکل (۲) استفاده از انرژی خورشیدی در فرایند تصفیه فاضلاب را نمایش می‌دهد. کاربرد حرارت خورشیدی در تصفیه فاضلاب اصولا شامل سه جنبه می‌باشد: الف) حرارت خورشید توسط کلکتور خورشیدی جمع‌آوری شده و در افزایش دمای فرایند و به تبع آن افزایش راندمان تصفیه استفاده شود (Mahmoodi و همکاران، ۲۰۱۸). ب) استفاده از حرارت خورشید در آب‌گیری از لجن یا کاهش محتوای آب فاضلاب در برخی فرآیندهای تصفیه فاضلاب صنعتی (Rodríguez و همکاران، ۲۰۱۸). ج) حرارت خورشید را می‌توان در تبخیر فاضلاب و تصفیه آن در برخی فاضلاب‌های خاص صنعتی استفاده نمود (Rodríguez و همکاران، ۲۰۱۸). کاربرد پنل‌های فتوولتائیک در تصفیه فاضلاب بیشتر دو جنبه را شامل می‌شود: الف) تأمین برق فرایند الکترولیز در پاکسازی آلاینده‌ها. ب) تأمین برق مورد نیاز در تصفیه بیولوژیکی فاضلاب شهری (Taha و Al-Sa'ed،۲۰۱۷).



شکل ۲- نقاط مصرف انرژی در فرایند تصفیه فاضلاب (Guo و همکاران، ۲۰۱۹)

مرور کامل نمونه‌های کاربرد سیستم‌های حرارت خورشیدی در تصفیه فاضلاب در این مجال نمی‌گنجد و در صورت نیاز می‌توان با مراجعه به (Luboschik، ۱۹۹۹؛ Hervas و همکاران، ۲۰۱۷؛ Liu و Huang، ۲۰۱۵؛ Foteinis و همکاران، ۲۰۱۸؛ Mathioudakis و همکاران، ۲۰۰۹؛ Khan Mamun و همکاران، ۲۰۱۷) اطلاعات دقیق‌تری در این باره کسب نمود. در این پژوهش بیشتر در رابطه با کاربرد برق فتوولتائیک بحث خواهد شد که برخی محققین معتقد هستند کاربرد آن در تأمین برق فرایند تصفیه بیولوژیکی می‌تواند مصرف برق در تأسیسات تصفیه فاضلاب شهری را کاهش دهد (Fadhil and El-Halwagi ۲۰۱۸). اینگونه ایستگاه‌های تصفیه به‌صورت تمام وقت تحت بار کامل کار می‌کنند و مصرف برق بالایی دارند. هزینه برق در این مراکز، بالغ بر ۳۰ درصد هزینه‌ها را تشکیل می‌دهد. در صورت بهره‌گیری از قراردادهای ممیزی انرژی و بهینه‌سازی مصرف انرژی در کنار به‌کارگیری انرژی خورشیدی ظرفیت بهره‌وری دو چندان افزایش می‌یابد. Hudnell و همکاران (۲۰۱۱) روش سنتی هوادهی در استخر اکسیداسون را با ایجاد اغتشاش و چرخش در مخزن جایگزین نمودند و برق مورد نیاز آن را با پنل‌های فتوولتائیک تأمین کردند. به‌این‌ترتیب نه تنها هزینه‌های جاری فرایند را کاهش دادند، بلکه از نظر کاهش بوی فاضلاب، کاهش تولید لجن، و کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای به پیشرفت چشمگیری دست یافتند. Han و همکاران (۲۰۱۳) از پنل فتوولتائیک بدون باتری برای تأمین برق حوضچه اکسیداسیون استفاده کردند که در طرح آنها آغاز به کار و خاموش شدن سیستم خورشیدی به‌صورت خودکار با سنجش شدت تابش خورشیدی انجام می‌شود.

همچنین از فرصت‌های موجود در ایستگاه‌های تصفیه فاضلاب می‌توان به‌منظور تولید برق خورشیدی مازاد و فروش یا مصرف آن در تأسیسات دیگر استفاده نمود. به‌این‌ترتیب تأسیسات مورد نظر از نظر تراز انرژی مثبت خواهد شد. تصفیه‌خانه‌های فاضلاب عموماً تعداد زیادی تانک هوادهی دارند که فضای زیادی را در تصفیه‌خانه اشغال می‌کنند. می‌توان به خوبی از سطح روی این تانکرها برای نصب پنل فتوولتائیک استفاده نمود. همچنین مخزن اصلی تصفیه فاضلاب نیز فضای خوبی به‌این‌منظور فراهم می‌نماید. همچنین سطح استخرهای روباز موجود در تصفیه خانه‌ها که معمولاً بیشتر سطح ایستگاه را تشکیل می‌دهند نیز از سه جهت برای نصب آرایه خورشیدی مزیت دارد: الف) سایه پنل‌ها روی سطح استخر باعث کاهش تبخیر و هدر رفت آب می‌شود ب) کاهش تابش نور به درون استخر از رشد بی‌رویه میکروارگانیسم‌ها جلوگیری می‌کند ج) هوای نزدیک به سطح استخر خنک‌تر از محیط می‌باشد که باعث خنک شدن پنل‌های خورشیدی و افزایش راندمان کارکرد آن‌ها می‌شود. از این ایده در ایجاد نیروگاه فتوولتائیک ۴۰۰ کیلوواتی تصفیه‌خانه جنوب شرق تهران به خوبی بهره‌گیری شده است (راه‌اندازی نیروگاه خورشیدی در تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران،۱۳۹۷). در آن تصفیه‌خانه،۱۱۷۷ عدد پنل خورشیدی روی کانال پساب خروجی نصب شده که مساحت ۳۱۲۰ مترمربع از این کانال را پوشش می‌دهد. نصب این پنل‌ها به‌صورت شناور نبوده و با استفاده از سازه‌های بالاست فلزی در طرفین کانال تکیه شده است. به‌این‌ترتیب پنل‌ها روی کانال سایه می‌اندازند (شکل ۳). در تصفیه‌خانه فاضلاب شرق چین که ظرفیت تصفیه ۸۰۰ هزار تن فاضلاب در روز را دارد، با نصب و راه‌اندازی سامانه فتوولتائیک، به میزان ۸۴٪ در مصرف انرژی صرفه‌جویی شده است (Xu و همکاران،۲۰۱۷).

شکل ۳- نصب پنل‌ها روی کانال فاضلاب و امتداد در مسیر آن در نیروگاه ۴۰۰ کیلوواتی تصفیه‌خانه جنوب تهران (راه‌اندازی نیروگاه خورشیدی در تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران،۱۳۹۷)

Guo و همکاران (۲۰۱۹) با روش‌شناسی پروژه‌های انجام شده در زمینه تصمیم‌گیری در ساخت نیروگاه خورشیدی در تأسیسات آب و فاضلاب، روش‌های مورد استفاده را طبقه‌بندی نمودند. براساس پژوهش آن‌ها، روش‌های تصمیم‌گیری شامل روش تحلیل سلسله مراتبی[۶]، تحلیل چرخه عمر[۷]، برآورد جامع فازی[۸]، مقایسه مصرف انرژی مخصوص[۹] و روش مقایسه مصرف انرژی هر واحد[۱۰] می‌باشد. در روش مقایسه مصرف انرژی واحد، تأسیسات مورد نظر به واحدها و بخش‌های جداگانه‌ای تقسیم شده و مصرف انرژی هر یک از جنبه‌های گوناگون بررسی و شاخص‌های ویژه‌ای که برای آن‌ها وجود دارد محاسبه و با یکدیگر مقایسه می‌شود. به‌این‌ترتیب بخش‌هایی که بیشترین مصرف و هدررفت انرژی را دارند مشخص شوند. این شاخص‌ها را می‌توان در گروه‌های ذیل طبقه‌بندی نمود: شاخص‌های دستگاه، شاخص‌های مصرف انرژی مخصوص، شاخص‌های آلایندگی، بهره‌برداری و بازیافت از منابع، بهره‌برداری و مدیریت، مدیریت و پایداری. جزئیات بیشتر درباره انواع شاخص‌های هر یک از این گروه‌ها را می‌توان در تحقیقات (Guo و همکاران، ۲۰۱۹) مشاهده نمود.

به‌عنوان نمونه خارج از کشور از انجام چنین پروژه‌هایی، می توان به تأمین برق مورد نیاز تصفیه‌خانه فاضلاب شهر جدید سیلور سیتی[۱۱] در ایالات متحده با استفاده از پنل‌های خورشیدی اشاره نمود. سیستم مذکور در سال ۲۰۱۳ نصب و راه‌اندازی شد و در آن سال پیش بینی شد در یک دوره ۲۰ ساله، مبلغ چهار میلیون دلار صرفه‌جویی در قبض برق آن تأسیسات خواهد شد (Solar Electricity Powers the Wastewater Treatment Plant، ۲۰۱۹). در دره اردن در پی خشکسالی‌های دهه اخیر، نیاز شدید به تأمین آب کشاورزی، مسئولین را به این نتیجه رسانده که از فاضلاب تصفیه شده ایستگاه تصفیه فاضلاب تل المنطح به‌منظور کمک به آبیاری مزارع اطراف بهره‌گیری کنند. به‌این‌منظور ابتدا باید ظرفیت تصفیه آن ایستگاه را پایدار سازی می‌کردند. با وجود شبکه برق سراسری در آن منطقه، قرار گرفتن ایستگاه در حاشیه‌های شبکه و همچنین مشکلات تولید و توزیع برق سراسری در اردن، باعث شده مشکل اصلی در آن ایستگاه

عدم تأمین برق با کیفیت و ثابت بوده باشد. به‌منظور تأمین برق خورشیدی برای ایستگاه، یک آرایه فتوولتائیک نصب شد که ۹۰ درصد از برق ایستگاه را تأمین می‌نماید. باتوجه‌به هزینه نسبتا زیاد برق در اردن، مقادیر قابل توجهی صرفه‌جویی اقتصادی از این محل حاصل می‌شود که برنامه‌ریزی شده در تأمین قطعات جدید، تعمیرات، و تست شیمیایی کیفیت آب هزینه شود (Laura Maeso Velasco and Udo Gattenlöhner، ۲۰۱۹). با توجه به گزارش سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده[۱۲]، مشخص شد چهار درصد از برق کشور در صنعت آب و فاضلاب مصرف می‌شود و ۴۰٪ از هزینه‌های جاری ایستگاه‌های تصفیه فاضلاب را قبوض برق تشکیل می‌دهد. به همین دلیل، ایجاد نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتائیک درون ایستگاه‌ها یا زمین‌های اطراف تصفیه‌خانه‌ها و ایستگاه‌های پمپاژ در دستور کار قرار گرفته است. به‌عنوان نمونه، در شهر اسپراگ ایالت کنتیکت، یک شرکت انرژی تجدیدپذیر نیروگاه فتوولتائیکی در زمین جنب تصفیه‌خانه فاضلاب ایجاد نموده که با ۳۷۸ پنل و ظرفیت ۱۳۷ کیلوواتی خود ۸۰ درصد از برق مورد نیاز تصفیه‌خانه را تولید می‌نماید (Ludt، ۲۰۱۹). لازم به ذکر است مدل مالکیت و شکل قرارداد خرید برق[۱۳] در ایالات متحده (و اغلب کشورها) با مدلی که در ایران اتخاذ شده متفاوت می‌باشد. در مدل کشورهای پیشرفته، قرارداد خرید تضمینی برق مابین مصرف کننده و یک شرکت انرژی تجدیدپذیر منعقد می‌شود طی آن شرکت مذبور موظف است نیروگاه را ساخته، بهره‌برداری و طی مدت قرارداد (معمولا ۲۰ ساله) نگهداری نماید. به‌این‌ترتیب مالکیت نیروگاه نیز به شرکت سازنده خواهد رسید. در این میان، نکته مثبت برای سفارش دهنده نیروگاه (خریدار برق) این است که برق خود را با نرخ ثابتی که کمتر از تعرفه برق شبکه سراسری است در کل مدت قرارداد تهیه و تضمین می‌نماید. از طرفی، علاوه‌بر کمک به حفظ محیط‌زیست، از برخی معافیت‌های مالیاتی و امتیازهای اعتباری برخوردار خواهد شد. به‌عنوان مثال در نمونه‌ای که ذکر شد، شرکت گرین اسکایز[۱۴] که یک شرکت انرژی تجدیدپذیر می‌باشد با مالک تصفیه‌خانه قرارداد خرید تضمینی برق منعقد کرده و طی دوره ۲۰ ساله تمام عملیات نگهداری نیروگاه را بر عهده گرفته و برق تولیدی را با قیمت مشخصی به تصفیه‌خانه می‌فروشد. این برخلاف ایران است که مالکیت نیروگاه خورشیدی در اختیار صاحب ملک باقی مانده، بهره‌برداری معمولا بر عهده مالک است مگر آن که قرارداد جداگانه‌ای در این باره منعقد شود و خریدار برق تولیدی نیز سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر ایران می‌باشد. دلیل اصلی ایجاد این مدل در کشورمان، تفاوت در سیاست‌گذاری های کلان است، به‌نحوی‌که قیمت خرید تضمینی برق توسط دولت بسیار بیشتر از تعرفه برق شبکه است. درحالی‌که در کشور امریکا، تعرفه برق شبکه سراسری بیشتر از نرخ خرید تضمینی برق خورشیدی می‌باشد. این باعث شده انگیزه لازم برای فروش برق به مصرف کننده نهایی آن فراهم شود و قراردادها مابین سازنده نیروگاه و مصرف کننده نهایی برق منعقد می‌شوند. همچنین در سال ۲۰۱۵، شورای شهر کوچک لدیارد[۱۵] متوجه شدند بزرگترین مصرف کننده واحد برق در شهر، تأسیسات تصفیه فاضلاب آن شهر می‌باشد. به همین دلیل یک نیروگاه فتوولتائیک در زمین‌های اطراف حوضچه‌های آرامش فاضلاب در داخل محدوده ایستگاه در دستور ساخت قرار گرفت. ظرفیت مورد نظر بالغ بر ۲۶۰ کیلووات شامل ۸۲۶ پنل خورشیدی بوده و قیمت خرید تضمینی برق در بازه ۲۰ ساله نیمی از مبلغی بوده که برق شبکه را از ترنس کانادا خریداری می‌کردند. مدل قرارداد خرید برق در این مورد نیز مشابه حالتی است که توضیح داده شد. شهر لدیارد هیچ هزینه‌ای برای خرید و نصب تجهیزات و نگهداری آن پرداخت نمی‌کند (Lynch، ۲۰۱۵).

علاوه بر صرفه‌جویی حاصل از نصف شدن قبض برق، سیستمی در کشورهای پیشرفته وجود دارد که برای تولید برق در ساعات پیک شبکه، اعتباری را به تولید کننده (تصفیه‌خانه شهر) اختصاص می‌دهد. این سیستم با نام اندازه‌گیری خالص[۱۶] شناخته می‌شود، از کنتورهای دو طرفه برای مشترکین تولید کننده برق استفاده کرده و طبق سیاست‌گذاری‌های هر کشور، امکان استفاده از برق تولیدی را در هر زمانی که به آن نیاز باشد فراهم می‌آورد. به‌عنوان مثال برق تولیدی از پنل‌های فتوولتائیک که در ساعات پیک شبکه (و حداکثر تعرفه خرید برق) تولید می‌شود به شبکه ارسال شده و در عوض همان مقدار برق در ساعات شب با مبلغ ارزان‌تر از طرف شبکه ارائه می‌شود. همچنین، میزان مازاد تولید یک ماه را می‌توان در ماه‌های بعد به مصرف رساند. همچنین در صورت تمایل می‌توان تفاوت تعرفه ساعات اوج بار و کم باری را از شرکت برق منطقه مورد نظر دریافت نمود. نکته دیگری که از مثال شهر لدیارد می‌توان آموخت، این است که در کشور امریکا سوبسیدهای دولتی قابل توجهی برای ساخت نیروگاه خورشیدی، حتی به تأسیسات آب و فاضلاب پرداخت می‌شود که انگیزه‌ای برای حرکت به سمت توسعه پایدار است. همچنین مدل‌های مشخصی برای تأمین مالی پروژه‌های این چنینی از طریق سرمایه‌گذاری بخش خصوصی وجود دارد که ایجاد نیروگاه در ایستگاه‌های آب و فاضلاب را تسهیل نموده و سرمایه‌گذاران را به این سمت جذب کرده است. نمونه موفق دیگر که مشابه با دو نمونه قبلی در سال ۲۰۱۸ در تصفیه‌خانه فاضلاب شهر میدلتون امریکا ساخته شده، شامل ۷۱۴ پنل خورشیدی است که سالانه ۲۸۰ مگاوات ساعت برق برای مصرف تصفیه‌خانه تولید می‌کند. این مقدار انرژی الکتریکی برابر با ۷۵ تا ۸۵ درصد از کل مصرف تصفیه‌خانه‌ای است که تا پیش از آن بزرگترین مصرف کننده برق در شهر بوده است (Solar، ۲۰۱۹).

عمده اطلاعات در دسترس در مورد سامانه‌های خورشیدی منصوبه در تأسیسات آب و فاضلاب محدود به خبرهای منتشر شده در اخبار می‌باشد و این مسئله هرگونه اظهار نظر در رابطه با کارایی و صرفه‌جویی‌های حاصل از بهره‌برداری این سامانه‌ها را دشوارتر ساخته است. با این وجود، در یک نمونه خاص از نصب نیروگاه خورشیدی در تصفیه‌خانه فاضلاب شهر کوچک چارلتون ایالت ماسچوست، گزارشی از کارکرد آن پس از پنج سال منتشر شده که نشان می‌دهد به خوبی توانسته نیمی از برق تأسیسات را تأمین نماید. ظرفیت تصفیه‌خانه ۲۰ هزار گالن در روز بوده که با ۱۴/۵ کیلووات پنل خورشیدی بخشی مصرف برق آن پوشش داده شده است. برخلاف تصور عموم، نیروگاه

فتوولتائیک حتی در روزهای ابری چیزی در حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد از ظرفیت حداکثر خود برق تولید می‌کند. به‌این ترتیب پیش‌بینی می‌شود دوره بازگشت سرمایه آن سریعتر از میزان پیش‌بینی شده، یعنی ۱۷ سال، باشد (Day، ۲۰۱۰).

اما نیروگاه فتوولتائیک یک مگاواتی که در تصفیه‌خانه شهر بولدر کلورادو ایجاد شده، هم نمونه‌ای خوب برای مقیاس مگاواتی و هم نمونه‌ای موفق از تأمین مالی از منابع خارجی می‌باشد. تأمین مالی از مسیر تسهیلات شرکت ثالثی غیر از طرفین قرارداد خرید تضمینی برق صورت پذیرفته است. ضمنا برق خورشیدی فقط ۱۴٪ از مصرف را شامل می‌شود که در ترکیب با سیستم تولید همزمان در مجموع به ۳٪ از کل مصرف تأسیسات ایستگاه می‌رسد. شایان ذکر است مقالات و اخبار منتشر شده نشان می‌دهد، کاربرد تولید همزمان برای تولید برق تجدیدپذیر در فرآیندهای تصفیه فاضلاب می‌تواند بسیار کارآمد باشد (Wastewater Treatment Facility Solar Electric System، ۲۰۲۰). در شرایطی که زمین کافی در دسترس نباشد و پشت‌بام کافی و مناسب هم در محل وجود نداشته باشد، به راحتی می‌توان پنل‌های فتوولتائیک را به‌صورت شناور روی سطح آب نصب نمود. این ویژگی خاصی است که ایستگاه‌های تصفیه فاضلاب فراهم می‌کنند. سطح حوضچه‌های آرامش یا هر مخزن روباز دیگری، فضای مناسبی برای شناورسازی پنل‌های خورشیدی است. اینگونه پنل‌ها بدون نیاز به سازه فلزی (بالا است) متداول یا بتن، تنها با استفاده از شناورهایی از جنس پلی‌اتیلن، روی آب قرار می‌گیرند. چنین ساختاری، نه تنها مزایای عمومی مزارع خورشیدی از قبیل صرفه‌جویی در قبض برق و جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه‌ای را دارد، بلکه از اشغال زمین مفید جلوگیری کرده، تبخیر آب مخزن و رشد ریز جلبک‌ها در مخزن را کاهش می‌دهد که علت آن جلوگیری از تابش آفتاب به مخزن می‌باشد. همچنین، از آنجایی‌که جریان آب درون مخزن محدود می‌شود، ساییدگی و تخریب حاشیه مخزن نیز کمتر می‌شود. به‌عنوان نمونه موفق از نصب پنل‌های خورشیدی شناور در تصفیه‌خانه فاضلاب، می‌توان به پروژه ۲۵۲ کیلوواتی در شمال کالیفرنیا اشاره نمود. این پروژه که بدون مخازن باتری طراحی شده، سالانه بیش از ۹۰ هزار دلار برای تصفیه‌خانه شهر کاهش قبض برق را به همراه دارد، از انتشار ۱۳۱ تن کربن دی‌اکسید جلوگیری می‌کند و با همکاری شهرداری، هیچ هزینه اولیه برای نصب آن پرداخت نشده و از سال اول بازگشت سرمایه آغاز شده است. تصفیه‌خانه با عقد قرارداد اجاره به شرط تملیک با شهرداری (لیزینگ)، توانسته طی اقساط ثابت در بلند مدت هزینه را پرداخت نماید (Eva Pauly-Bowles، ۲۰۱۹). در جدیدترین پروژه از این دست اقدامات بلندپرواز به‌منظور تأمین برق خورشیدی در تأسیسات آب و فاضلاب در دنیا، اخیرا شرکت آی بی سی سولار[۱۷] اعلام نموده قصد راه‌اندازی نیروگاه ۲/۷ مگاواتی فتوولتائیک در تأسیسات تصفیه آب شهر هانوئی ویتنام دارد و قرارداد آن بسته شده است. به‌این‌ترتیب آب‌رسانی به ۱/۵ میلیون نفر ساکن شهر هانوئی به‌صورت پایدار و تجدیدپذیر صورت خواهد گرفت و مبلغ هنگفتی در قبض برق تأسیسات صرفه‌جویی خواهد شد. همچنین مسئولان شهر هانوئی اعلام نمودند قصد گسترش این طرح تا ظرفیت ۱۰ مگاوات را در سر دارند (IBC SOLAR Energy is going to implement solar drinking water supply in Hanoi، ۲۰۲۰). در یک طرح نوآورانه تجاری که توسط شرکت پادتنکس[۱۸] انجام شده، یک سیستم کوچک تصفیه فاضلاب کامپکت ساخته شده که برق مورد نیاز فن هوادهی فاضلاب در آن توسط پنل خورشیدی ۵ وات تأمین می‌شود. این دستگاه در کشور انگلستان تولید شده و در سراسر اروپا به فروش می‌رسد (Waste Water Sewage Treatment Plants - PodTanks Sewage Systems، ۲۰۲۰). مطالعه جامعی بر تأسیسات تصفیه فاضلاب در ایالت کالیفرنیا امریکا که استفاده از تکنولوژی فتوولتائیک در تأسیسات آب و فاضلاب آن رایج می‌باشد، سعی بر پارامتریزه نمودن تجربیات پیشین داشته است. به‌این‌معنی که تأسیسات تصفیه که دارای نیروگاه خورشیدی می‌باشد را مشخص و از نظر دبی فاضلاب ورودی به دو گروه بیش از ۵ و کمتر از ۵ مگا گالن در روز تقسیم نموده و دریافته در تأسیسات بزرگتر از ۵ مگاگالن در روز سیستم فتوولتائیک، عموما به‌صورت هیبرید با هاضم بی‌هوازی نصب و استفاده می‌شود. در این گونه تأسیسات، بیشتر تولید برق توسط هاضم بی‌هوازی انجام می‌شود. در حالی‌که در تصفیه‌خانه‌هایی با جریان کمتر از ۵ مگاگالن در روز، انرژی خورشیدی تنها گزینه مورد استفاده است و بین ۳۰ تا ۱۰۰ درصد از برق مورد نیاز را تأمین می‌نماید. همچنین، نتایج این تحقیق نشان داد محبوب‌ترین مقیاس نیروگاه خورشیدی در تأسیسات فاضلاب ظرفیت ۱ مگاات می‌باشد و نیروگاه‌های فتوولتائیک را بیشتر می‌توان در سایت‌های روستایی پیدا کرد (Strazzabosco, Kenway, and Lant، ۲۰۱۹). علت دیگری که می‌تواند توجیهی برای ساخت نیرگاه خورشیدی در تأسیسات آب و فاضلاب باشد، وجود تهدید بلایای طبیعی در منطقه‌ای خاص می‌باشد. در برخی مناطق، هر ساله وقوع سیل و طوفان، باعث قطع برق شبکه به مدت طولانی می‌شود. به‌عنوان مثال، در کالدول نیوجرسی، این مشکل باعث از کار افتادن تصفیه‌خانه فاضلاب شهر، در بحرانی‌ترین شرایط، یعنی شرایط سیل زدگی می‌شد. این باعث شد، با استفاده از ۲۶۸۲ پنل فتوولتائیک و باتری‌های خورشیدی، علاوه‌بر کاهش هزینه برق، امکان کارکرد آن مرکز به مدت ۱۰ روز بدون برق شبکه سراسری فراهم شود (Chawaga،۲۰۱۷).

اما در کشورهای توسعه یافته، استفاده از انرژی خورشیدی در سامانه‌های فاضلاب تنها به تأمین برق تأسیسات تصفیه‌خانه و ساختمان‌ها محدود نیست و کاربردهای تخصصی‌تری نیز پیدا نموده است. به‌عنوان مثال در پژوهش انجام شده توسط (Valero، ۲۰۱۰) تأمین برق خورشیدی برای یک سیستم تصفیه الکتروشیمیایی (الکترواکسیداسیون) به‌منظور پاکسازی فاضلاب آلوده به مواد رنگی پیشنهاد و آزمایش شد. برق مورد نظر مستقیما توسط ۴۸ ماژول فتوولتائیک تأمین شد.Sharma و همکاران (۲۰۱۱) تأمین برق خورشیدی به‌منظور استفاده در یک سیستم تصفیه آب و فاضلاب با تکنولوژی انعقاد الکتریکی (الکتروکوآگولاسیون) بررسی کردند. سیستم مورد نظر به‌صورت مستقیم یا به واسطه باتری و شارژ کنترلر به پنل‌های فتوولتائیک متصل بود. نتایج نشان داد، استفاده از باتری

به پایداری بیشتر فرایند تصفیه، بهبود راندمان آن و افزایش ساعات کارکرد سیستم کمک نموده است. Han و همکاران (۲۰۱۳) سیستم تصفیه گودال اکسیداسیون را با استفاده از پنل خودشیدی و بدون منبع ذخیره برق پیشنهاد نمودند. به این ترتیب، سیستم اکسیداسیون در طی روز فعال بود و در طی ساعات شب فرآیندهای مطلوب جهت تصفیه نیتروژن و فسفات صورت می‌پذیرفت. سیستم مذکور توانست به درصد بالایی از حذف مواد آلاینده دست یابد. Rosa-Clot و همکاران (۲۰۱۷) استفاده از پنل‌های خورشیدی شناور و نصب آن‌ها روی مخزن چند تصفیه‌خانه فاضلاب در استرالیا را پیشنهاد نمودند. پیشتر، پنل‌های شناور معمولا روی مخزن سدها نصب می‌شدند. سیستم پیشنهادی آنها ساده‌ترین مشخصات ممکن از قبیل عدم وجود سیستم ردیابی خورشید را داشت اما کارایی آن در تولید برق خورشیدی به اثبات رسید.

در پژوهش‌های داخلی تلاش‌هایی به‌منظور به‌کار بستن انرژی خورشیدی در سامانه‌های آب و فاضلاب کشور گزارش شده است. صباح و هوشیاری (۱۳۸۹) موقعیت کشور ایران را از لحاظ پتانسیل دریافت انرژی تابشی و یکی از کاربردهای انرژی خورشیدی در تصفیه‌خانه فاضلاب بررسی کردند. وحیدی و همکاران (۱۳۹۰) کاربردهای انرژی خورشید و باد برای فرآوری پسماندهای شهری در تصفیه‌خانه‌ها را بررسی کردند. در پژوهش مذکور انرژی خورشیدی به‌صورت حرارتی و به‌منظور خشک کردن لجن حاصل از تصفیه استفاده شده است. در سال ۱۳۹۲ و با هدف امکان‌سنجی و شناسایی مکان و کاربردهای مناسب جهت استفاده از انرژی خورشیدی برای تأمین برق و گرمایش در ساختمان‌ها و ایستگاه‌ها و تأسیسات مختلف شرکت آب و فاضلاب استان همدان، طرحی در دانشگاه آزاد واحد همدان انجام شده که طی آن انواع سیستم‌های فتوولتائیک از قبیل مستقل، متصل به شبکه و هیبرید متناسب با انواع کاربردهایی که در سامانه‌های آبفا شناسایی شده‌اند بررسی و امکان‌سنجی شده است. نتایج این پژوهش شامل تحلیل فنی، اقتصادی و اجرایی سیستم‌های موثر تولید برق و حرارت خورشیدی می‌باشد (امکان‌سنجی استفاده از انرژی‌های خورشیدی در تأسیسات شرکت آب و فاضلاب همدان و اجرای برخی کاربری‌ها، ۱۳۹۲).

به طور خلاصه، کاربرد انرژی خورشیدی در فرایندهای تصفیه فاضلاب بسیار گسترده بوده و انرژی حرارتی و برق خورشیدی را شامل می‌شود. اگرچه تولید و استفاده از برق خورشیدی به‌علت سهل الوصول بودن آن بیش از حرارت خورشیدی مورد استقبال قرار گرفته است. تاکنون از برق خورشیدی بیشتر به‌منظور تأمین توان مورد نیاز برای پمپاژ و هوادهی فاضلاب استفاده شده است، اگرچه در کشورهای پیشرفته، استفاده از آن در فرآیندهای الکترو اکسیداسیون و الکتورکوآگولاسیون نیز پیشنهاد و آزمایش شده است. از نظر محل نصب پنل‌های خورشیدی، تجربیاتی در رابطه با نصب پنل به‌صورت شناور برروی استخرهای فاضلاب وجود دارد که نشان می‌دهد از چند جهت می‌تواند مفیدتر از نصب عادی برروی زمین باشد. کاربرد حرارت خوشیدی نیز بیشتر در افزایش راندمان فرایند تصفیه فاضلاب و خشک کردن لجن حاصل از تصفیه بوده است.

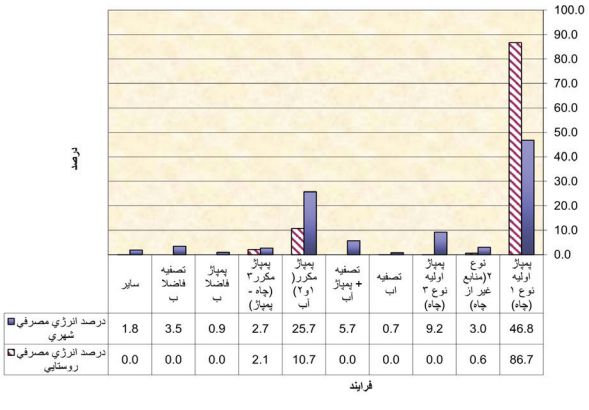
وضعیت شرکت‌های آب و فاضلاب از نظر مصرف انرژی و سرمایه‌گذاری در انرژی خورشیدی

در سال‌های اخیر و با گسترش توجه به لزوم کاهش مصرف انرژی و صرفه‌جویی در منابع زوال پذیر فسیلی، همچنین بهبود قانون‌گذاری در این رابطه که از آن جمله می‌توان به لزوم تأمین ۲۰ درصد نیاز برق ارگان‌های دولتی از منابع تجدید پذیر اشاره نمود. همچنین در راستای تحقق اقتصاد مقاومتی، تلاش‌هایی در راستای نصب سامانه‌های خورشیدی در ساختمان‌ها و تأسیسات تابعه شرکت آب و فاضلاب کشور صورت پذیرفته است. از آن جمله می‌توان به نصب و راه اندازی ۱۵ کیلووات نیروگاه خورشیدی با استفاده از ۵۸ پنل ۲۶۰ واتی و دو عدد اینورتر سه فاز و سازه‌های گالوانیزه در پشت‌بام ساختمان آبفای منطقه ۳ تهران اشاره نمود (طراحی و اجرای نیروگاه خورشیدی متصل به شبکه به ظرفیت ۱۵۰۰۰ وات برای شرکت آب و فاضلاب منطقه ۳، ۱۳۹۰). متین‌پور و حسین زاده (۱۳۹۷) با نصب نیروگاه خورشیدی فتوولتائیک در ساختمان ستاد مرکزی آبفا استان همدان میزان قابل توجهی از کاهش هزینه‌های برق آن ستاد را گزارش نمودند. همچنین شرکت آب و فاضلاب استان همدان با نصب پنل‌های خورشیدی به ظرفیت ۲۰ کیلووات در محل ساختمان ستاد مرکزی، توانسته مصرف انرژی ساختمان مذکور را در تابستان ۹۷ به میزان ۳۴,۲ درصد نسبت به تابستان ۹۶ کاهش دهد. این مهم موجب دریافت ۶۱۰ میلیون ریال تخفیف و کاهش هزینه دیماند برق به میزان سالانه ۶۶۰ میلیون ریال شده است (تولید ۲۰ کیلووات برق از انرژی خورشیدی ساختمان آبفای همدان، ۱۳۹۷). در استان قم در سال ۱۳۹۷، فاز دوم نیروگاه خورشیدی فتوولتائیک به ظرفیت ۲۵ کیلو وات در محل ساختمان ستاد مرکزی شرکت آب و فاضلاب با هزینه ۱۰۷ میلیون تومان و در مساحت ۲۴۰ متر مربع راه‌اندازی شد، در مجموع دو فاز نیروگاه وظیفه تأمین ۲۵ درصد از کل مصرف برق ستاد را بر عهده دارند (بهره برداری از مرحله دوم نیروگاه خورشیدی ستاد مرکزی شرکت آب و فاضلاب، ۱۳۹۷). به گزارش خبرگزاری ایسنا (استفاده از انرژی خورشیدی در تصفیه‌خانه آب خرم‌آباد، ۱۳۹۵)، برق تصفیه‌خانه آب خرم آباد استان لرستان با استفاده از پنل‌های خورشیدی تأمین می‌شود که باعث صرفه‌جویی ۶ میلیارد ریالی در هزینه‌های شرکت آب و فاضلاب آن استان شده است. شرکت آب و فاضلاب استان قم، ساخت نیروگاه برقابی با ظرفیت سه مگاوات و استفاده از انرژی خورشیدی برای تأمین نیاز برق تأسیسات را از جمله پروژه‌های اقتصاد مقاومتی شرکت آبفای قم عنوان کردند (استفاده از انرژی خورشیدی برای تأمین نیاز برق تأسیسات در شرکت آبفای قم، ۱۳۹۶). براساس گزارش ارائه شده در سال ۹۷ ارائه شده (راه‌اندازی پنل خورشیدی در آبفای روستایی، ۱۳۹۷) در طرح دیگری در استان کهگیلویه و بویر احمد و در مناطق روستایی آن استان، سیستم تأمین برق خورشیدی مستقل از شبکه به‌صورت هیبرید پنل خورشیدی و ژنراتور بنزینی ایجاد شده که ساعات خاموشی سیستم پمپاژ آب را به حداقل رسانده است. ظرفیت تولید برق سیستم مذکور ۱۰ کیلووات

و هزینه آن حدود ۲۵۰ میلیون تومان بوده است. همچنین سامانه‌ای که در سال ۱۳۹۷ توسط آب و فاضلاب روستایی استان کهگیلویه و بویراحمد راه‌اندازی شد، به‌صورت هیبریدی توانایی تأمین برق خورشیدی با قابلیت ذخیره‌سازی و استفاده از پشتیبان برق شبکه سراسری را دارد. این سیستم متشکل از ۳۴ پنل ۳۲۰ واتی است که قابلیت ذخیره‌سازی ۱۲۰ کیلووات ساعت برق طی ۶ ساعت مفید در روز را دارد. به‌این‌ترتیب در روزهای ابری که خورشید در دسترس نباشد و در طول شب می‌توان به‌کار خود ادامه دهد و در صورت تخلیه کامل باتری‌ها، به شبکه برق متصل می‌شود.

• میزان مصرف انرژی و هزینه‌های برق در آبفا

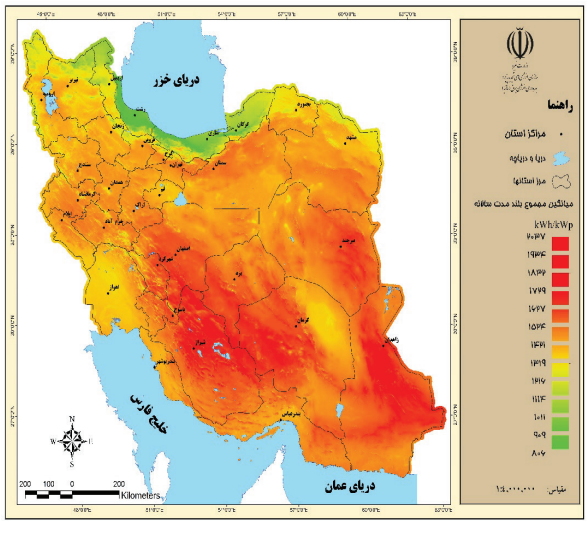
درصد انرژی مصرفی در تأسیسات مختلف آب و فاضلاب در سال ۱۳۹۳ را به تفکیک فرآیند می‌توان در شکل (۴) مشاهده کرد. در شرکت‌های آب و فاضلاب شهری در سطح کشور، تنها ۰٫۷ درصد از برق مصرفی در تصفیه آب، ۳٫۵ درصد در تصفیه فاضلاب و ۱٫۸ درصد در سایر مصارف مصرف می‌شود. درحالی‌که در شرکت‌های آب و فاضلاب روستایی، این ارقام صفر است و تقریبا تمام مصرف مربوط به پمپاژ نوع ۱ (چاه) می‌باشد (محمدقاسمی، ۱۳۹۴).



شکل ۴ - درصد انرژی مصرفی در تأسیسات مختلف آب و فاضلاب در سال ۱۳۹۳ به تفکیک فرآیند (محمدقاسمی، ۱۳۹۴)

طبق گزارش مرکز مدیریت مصرف انرژی سازمان آب و فاضلاب کشور، مصرف برق در سال ۹۴ در کل کشور ۷/۵ تراوات ساعت بوده است. گزارش مذکور هشدار داده در صورت عدم انجام پروژه‌های مدیریت مصرف انرژی در شرکت‌های آب و فاضلاب، بهای اضافی دیماند و انرژی به ۴۹۰ میلیارد ریال در سال خواهد رسید. این گزارش با در نظر گرفتن سهم هزینه انرژی الکتریکی در شرکت‌های آب و فاضلاب به رتبه‌بندی آن‌ها پرداخته و به‌ترتیب شرکت‌هایی را که دچار مشکلات عمده در پرداخت هزینه‌های انرژی خواهند شد اعلام نموده است. در این رتبه‌بندی در بخش آب به‌ترتیب شرکت‌های آب و فاضلاب استان تهران، استان خوزستان و شهر مشهد اول تا سوم هستند و وخیم‌ترین اوضاع را دارند. همچنین شرکت آب و فاضلاب استان خراسان رضوی در رتبه هفتم این رده‌بندی قرار گرفته است.

در بخش فاضلاب نیز استان‌های اصفهان، خوزستان، هرمزگان و اهواز رتبه‌های نخست را به خود اختصاص داده‌اند و به‌ترتیب بدترین شرایط را دارند. در هر دو بخش آب و فاضلاب، استان‌هایی که از نظر پرداخت هزینه‌های انرژی با مشکلات بسیار شدید مواجه هستند، اکثرا امکان بهره‌برداری زیاد از انرژی‌های تجدیدپذیر، خصوصا انرژی خورشیدی را دارند. در این رابطه، اطلس تابش خورشید در کشور را در شکل (۵) مشاهده می‌شود.



شکل ۵- اطلس میانگین تولید سالانه برق فتوولتائیک در کشور براساس کیلووات ساعت بر کیلووات)وبسایت سازمان انرژی‌های نو و تجدیدپذیر ایران ۱۳۹۹)

عدم توانایی در پرداخت به موقع و کامل هزینه برق توسط شرکت‌های آب و فاضلاب مشکلات ذیل را به همراه داشته است: ۱) انجام امور تعمیر و نگهداری تأسیسات برق رسانی آبفا که بر عهده شرکت برق می‌باشد منوط به پرداخت بدهی‌ها شده؛ ۲) تهدید به قطع برق تأسیسات آب و فاضلاب؛ ۳) عدم همکاری در تصحیح قبوض؛ ۴) با وجود بخشنامه‌های مکرر وزارت نیرو مبنی بر عدم قطع برق تأسیسات آبفا، برخی امور برق منطقه‌ای به‌صورت خودسرانه اقدام به قطع برق تأسیسات کرده‌اند؛ ۵) عدم رسیدگی، سرویس و نگهداری تجهیزات پست‌های برق و جایگزین نکردن تجهیزات مسروقه به علت بدهی سنگین شرکت‌های آب و فاضلاب (دفتر انرژی سازمان آب و فاضلاب کشور ۱۳۹۸ب؛ محمدقاسمی ۱۳۹۴). تولید برق تجدیدپذیر در بدنه شرکت‌های آب و فاضلاب کشور و فروش آن به شرکت برق می‌تواند در مرحله نخست با تصفیه تدریجی بدهی‌های سازمان، مشکلات ذکر شده را کاهش داده و شرایط را بهبود بخشد. تولید برق خورشیدی با استفاده از زمین‌های بلااستفاده، فضای خالی ایستگاه‌ها، سقف ساختمان‌ها و سطح مخازن بدون پرداخت هزینه زمین ممکن می‌باشد. از جهتی بلا استفاده گذاشتن این ظرفیت به نوعی پرداخت هزینه فرصت می‌باشد. این پیشنهاد به خوبی با اهداف و برنامه‌های آتی دفتر مدیریت مصرف انرژی آب و فاضلاب کشور که به شرح ذیل است، همخوانی دارد: ۱) تقسیط و جلوگیری از انباشت بدهی‌ها به

شرکت برق،۲) استفاده از ظرفیت‌های موجود و منابع طبیعی ایران به منظور تأمین برق تأسیسات جدید و تأسیسات در دست بهره‌برداری با استفاده از انرژی‌های نو.۳) جلب مشارکت بخش خصوصی جهت ساخت و بهره‌برداری نیروگاه برق خورشیدی در تأسیسات آبفا، ۴) استفاده از وام بانکی به‌منظور ایجاد نیروگاه برق تجدیدپذیر توسط شرکت‌های آبفا در سطح کشور (وب سایت رسمی دفتر مدیریت مصرف انرژی و سیستم‌های کنترل، ۱۳۹۹).

• سرمایه‌گذاری‌های انجام شده و صرفه‌جویی حاصل در امور آبفا[۱۹]

از دیدگاه میزان سرمایه‌گذاری‌های انجام شده، تنها ۲/۲ درصد از کل سرمایه‌گذاری‌های ریالی انرژی در شرکت‌های آب و فاضلاب به انرژی‌های نو اختصاص داده شده و بیشترین تمرکز مسئولین بر طراحی مجدد اشتراک‌های برق تأسیسات و فعالیت‌های تعمیر و نگهداری تجهیزات بوده است. استفاده از سیستم فتوولتائیک اغلب محدود به تأمین برق ساختمان‌های ستادی بوده است. با این حال ۳ درصد از صرفه‌جویی ریالی انرژی در سازمان را به خود اختصاص داده است که از نظر اندازه برابر با مجموع کاهش دیماند دائم و موقت بود. طبق آخرین آمار، تا سال ۱۳۹۴، پمپاژ خورشیدی جهت تأمین آب از چاه در سه شهر فرج آباد، میچینک و برج بالان احداث شده که در مجموع به ظرفیت ۱۱۵ متر مکعب بر ساعت بالغ می‌شود. هزینه اجرای پروژه‌های خورشیدی در هر سه مورد با در نظر گرفتن هزینه اولیه، هزینه خرید و نصب تجهیزات، هزینه انرژی طی دوره عملکرد، هزینه تعمیر و نگهداری و هزینه جاده‌سازی که برای تأمین برق شبکه سراسری صرف می‌شود از هزینه شبکه کمتر بوده است (محمدقاسمی، ۱۳۹۴). براساس ترازنامه انرژی شرکت آبفا (ترازنامه انرژی شرکت های آبفا شهری ۱۳۹۷، ۱۳۹۸)، مجموعا ۱۱۸ کیلووات ظرفیت فتوولتائیک نصب شده تا سال ۱۳۹۷ در کل تأسیسات و ساختمان‌های اداری شرکت‌های آبفا در کشور بوده است. شایان ذکر است، گزارش مذکور پیش از راه اندازی نیروگاه فتوولتائیک تصفیه خانه جنوب تهران منتشر شده که ظرفیتی معادل ۴۰۰ کیلووات دارد. به‌این ترتیب تا کنون طبق آخرین آمار منتشره، مجموع ظرفیت منصوبه فتوولتائیک در بدنه شرکت‌های آبفا با احتساب نیروگاه جدید التاسیس در تصفیه‌خانه جنوب تهران بایستی ۵۱۸ کیلووات باشد. جهت کسب اطلاعات دقیق‌تر درباره جزئیات مصرف برق در شرکت‌های آبفای شهری و روستایی خراسان رضوی و آبفای شهری و روستایی مشهد، هزینه پرداخت شده جهت قبوض برق، و همچنین ظرفیت‌های منصوبه فتوولتائیک در این شرکت‌ها (جدول ۱) (از ترازنامه انرژی و گزارش عملکرد آبفا، منتشره در وب سایت آبفا کشور؛ ترازنامه انرژی شرکت‌های آبفا روستایی، ۱۳۹۷-۱۳۹۸؛ ترازنامه انرژی شرکت های آبفا شهری ۱۳۹۷-۱۳۹۸). براین‌اساس، در شرکت‌های آب و فاضلاب روستایی هیچگونه نیروگاه فتوولتائیک احداث نشده و در شرکت‌های آب و فاضلاب شهری نیز این مقدار تنها به ۱۶۵۲ کیلووات محدود می‌شود. با در نظر گرفتن میانگین ساعات آفتابی در ایران به میزان ۸ ساعت در روز یا ۲۹۲۰ ساعت در سال (مجرد و مرادی، ۱۳۹۳)، عدد تقریبی پنج میلیون کیلووات ساعت تولید برق خورشیدی در سال می‌شود، که در حدود ۰٫۱ درصد از مصرف برق آب و فاضلاب شهری در کشور را پوشش می‌دهد.

جدول ۱- جزئیات مصرف و هزینه برق، ظرفیت منصوبه فتوولتائیک و صرفه جویی حاصل از آن در شرکت‌های آب و فاضلاب شهری و روستایی کشور، خراسان رضوی و مشهد (دفتر انرژی سازمان آب و فاضلاب کشور ۱۳۹۸الف و ۱۳۹۸ب)

شرکت آبفای مربوطه	مصرف برق (kWh)	هزینه برق (هزار ریال)	قیمت برق[۱] (IRR/kWh)	ظرفیت فتوولتائیک منصوبه تا پایان سال ۹۷ (kW)	صرفه‌جویی حاصله در سال ۹۷ (هزار ریال)[۲]
روستایی کشور	۱،۶۱۴،۵۹۲،۷۱۲	۲۴۴،۶۶۷،۹۸۶	۱۵۲	-[۳]	-[۳]
روستایی خراسان رضوی	۱۲۲،۵۳۸،۶۶۷	۴۹،۴۷۷،۶۱۷	۴۰۴	-[۳]	-[۳]
شهری کشور	۴،۹۲۹،۰۲۱،۵۷۷	۱،۹۹۳،۸۶۷،۷۲۸	۴۰۵	۱،۶۵۲ *	۱۰،۷۷۸،۲۷۲
شهری خراسان رضوی	۱۷۴،۲۲۰،۸۵۴	۷۷،۰۶۱،۴۳۴	۴۴۲	۱۲	۶۳،۰۰۰
شهری مشهد	۳۲۶،۱۴۷،۸۰۱	۱۴۲،۵۳۴،۸۳۹	۴۳۷	۳۴	۳۹۶،۶۲۲

۱ خارج قسمت تقسیم هزینه برق بر مصرف برق. قیمت میانگین برق.

۲ صرفه‌جویی منحصرا حاصل شده از سامانه‌های فتوولتائیک که در آن سال در شرایط بهره‌برداری بودند.

۳ گزارش نشده/صفر

* این گزارش پیش از بهره‌برداری نیروگاه فتوولتائیک تصفیه‌خانه جنوب شرق تهران (۴۰۰ کیلووات) تهیه شده و شامل آن نمی‌باشد.

طبق جداول عملکرد شرکت‌های آبفای روستایی و شهری در سال ۱۳۹۷ که توسط مرکز مدیریت مصرف انرژی آبفا کشور منتشر شده (عملکرد شرکت های آبفا روستایی ۱۳۹۷-۱۳۹۸؛ عملکرد شرکت های آبفا شهری ۱۳۹۷-۱۳۹۸)، امتیازی برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی برای شرکت‌های روستایی منظور نشده است. این امتیاز که نسبت صرفه‌جویی انجام پذیرفته به اعتبار هزینه شده در بخش انرژی و هزینه جاری برق را نشان می‌دهد (به‌صورت درصد)، برای آبفا شهری خراسان رضوی ۲۹ بوده است که باعث شده امتیاز بهره‌وری انرژی این شرکت از ۲۰ تنها ۶ باشد. این ارقام برای شرکت آب و فاضلاب شهری مشهد تقریباً در همین حدود و به‌ترتیب ۳۵ و ۷ بوده است.

به‌طورکلی در ایران، با وجود تمام محدودیت‌ها و تحریم‌ها و کمبودهای مالی و نقصان سیاست‌گذاری، اخیراً اهمیت حرکت به سمت استفاده بیشتر از انرژی‌های تجدیدپذیر خصوصاً خورشیدی در تأمین برق تأسیسات آب و فاضلاب درک شده و مسئولین به این سمت در حرکت هستند. با تاکید بر لزوم استفاده از سامانه فتوولتائیک در تأمین بخشی از توان مورد نیاز تجهیزات پمپاژ و برقی:: " تمام شرکت های آب و فاضلاب باید به این سمت حرکت کنند تا درصد زیادی در مصرف انرژی صرفه جویی شود." وی همچنین راهکار مناسب برای تأمین مالی بخشی از چنین پروژه‌هایی را تعیین تکلیف و فروش اموال مازاد شرکت‌های آب و فاضلاب کشور دانست.

چالش‌های مرتبط با مصرف انرژی در صنعت آب و فاضلاب کشور

باتوجه‌به مروری که بر ادبیات پژوهش صورت گرفت و همچنین براساس دانسته‌ها و تجربیات نگارندگان این مقاله، به نظر می‌رسد مهمترین مسأله‌ای که باعث شده استفاده از برق فتوولتائیک جهت تأمین توان مورد نیاز تأسیسات آب و فاضلاب در کشور بسیار کمتر از حد مورد انتظار باشد، مساله نحوه تأمین مالی در چنین پروژه‌هایی است. در شرایطی که سازمان‌های دولتی با مشکلات مالی دست به گریبان هستند و بودجه‌های عمرانی محدود است، سرمایه‌گذاری مستقیم سازمان در تاسیس نیروگاه فتوولتائیک امری دور از انتظار می‌باشد. بنابراین جذب سرمایه‌گذاری از خارج از سازمان بهترین گزینه خواهد بود. درحالی‌که سیاست‌گذاری کنونی در کشور به‌نحوی است که خرید تضمینی برق تولید شده در مولدهای فتوولتائیک توسط وزارت نیرو و ساتبا با بالاترین نرخ، بسیار بیشتر از تعرفه برق شبکه سراسری، صورت می‌پذیرد و این باعث شده سازندگان نیروگاه اشتیاقی به فروش مستقیم برق تولیدی خود به سازمان آب و فاضلاب نداشته باشند. شایان ذکر است در کشورهایی که احداث نیروگاه فتوولتائیک در تأسیسات آب و فاضلاب گسترش زیادی داشته، سرمایه‌گذار است که نیروگاه را احداث کرده، مالکیت آن را در اختیار دارد، از آن نگهداری نموده و در نهایت برق تولیدی را طی دوره قرارداد به نرخ ثابتی که بسیار کمتر از تعرفه برق شبکه سراسری است مستقیماً به مصرف کننده می‌فروشد.

اما مساله دیگری که می‌تواند عامل کند شدن احداث مولدهای برق خورشیدی خصوصاً جهت استفاده در تأسیسات باشد، عدم انگیزه کافی در بدنه سازمان بوده که بعضا از عدم اطلاع کافی در رابطه با امکان پذیر بودن و مزایای اقتصادی و محیط‌زیستی این سیستم نشات‌می‌گیرد.

نتیجه‌گیری

بخش قابل توجهی از برق تولیدی در جهان و در کشورمان توسط شرکت‌های آب و فاضلاب به مصرف می‌رسد. در شرایطی که نگرانی‌های محیط‌زیستی در جهان رو به افزایش بوده و از نظر اقتصادی، شرکت‌های آبفا در کشور با مشکلات شدید در پرداخت قبوض برق خود مواجه هستند، به راحتی می‌توان با استفاده از ظرفیت‌های بالقوه موجود، نسبت به ایجاد مولدهای فتوولتائیک اقدام و از هدر رفت سوخت و منابع مالی جلوگیری نمود. فضای لازم برای نصب تجهیزات نیروگاه در سایت‌های تأسیساتی آب و فاضلاب به‌صورت زمین خالی، پشت‌بام، و سطح مخازن روباز و روبسته فراوان وجود دارد. همچنین در اکثر تأسیسات موجود، برق شبکه سراسری موجود بوده و این باعث عدم نیاز به استفاده از باتری‌های خورشیدی و کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری خواهد شد. با این وجود، با بررسی تجربیات جهانی در این رابطه و مقایسه آن با وضعیت موجود در کشور، این نتیجه‌گیری حاصل می‌شود که وضعیت کنونی در کشور از نظر میزان به‌کارگیری برق خورشیدی در سامانه‌های آب و فاضلاب رضایت بخش نبوده و قابل مقایسه با مقیاس جهانی نمی‌باشد. در این مقاله، ضمن مرور نمونه‌های مشابه در جهان، تجربیات اگرچه محدود در ایران بررسی شد و نتیجه‌گیری که می‌توان داشت این است که چالش‌های اصلی که باعث عقب ماندن این صنعت از روند جهانی بوده را می‌توان در دو مورد خلاصه نمود: الف) مشکل در تأمین مالی طرح‌های این چنینی توسط سازمان‌های دولتی و نیمه دولتی که اساساً از نحوه سیاست‌گذاری‌های دولت و قیمت‌گذاری نرخ پایه خرید برق تجدیدپذیر نشات می‌گیرد. هزینه انجام چنین طرح‌هایی با توجه‌به نرخ تورم و برخی مشکلات دیگر، دائم در حال افزایش است. درحالی‌که از طرفی، بودجه کافی برای سرمایه‌گذاری مستقیم در نیروگاه‌های خورشیدی به صنعت آب و فاضلاب کشور اختصاص نمی‌یابد، از طرف دیگر، باتوجه‌به این که خرید برق تجدیدپذیر به‌صورت تضمینی و با نرخی بسیار بیشتر از تعرفه برق سراسری صورت می‌پذیرد، امکان عقد قرارداد BOT بین آبفا و بخش خصوصی در عمل از بین رفته است. ب) عدم انگیزه و اطلاع کافی در افراد تأثیرگذار در سازمان‌های ذی‌ربط نیز می‌تواند بسیار در این مساله تأثیر منفی داشته باشد.

اختصاص ردیف‌های بودجه‌ای به تأمین برق خورشیدی، و ایجاد مشوق‌هایی به‌منظور جذب سرمایه بخش خصوصی می‌تواند در رفع معضل تأمین مالی طرح‌های برق تجدیدپذیر در بدنه شرکت آب و فاضلاب تا حدی موثر باشد. مشوق‌های مذکور می‌تواند از هر نوعی از قبیل واریز وجه تشویقی، معافیت از پرداخت جرائم، کسب اولویت در مناقصات، کسب امتیاز در رتبه‌بندی شرکت‌های مجری و غیره باشد. از دیدگاه فرهنگی و اطلاع‌رسانی، با برگزاری دوره‌های توجیهی جهت انتقال تجربیات موفق جهانی و مزایای فنی و اقتصادی اجرای چنین طرح‌هایی و همچنین با انجام طرح‌های مطالعات امکان‌سنجی به‌صورت موردی و انتشار نتایج آن به‌منظور افزایش آگاهی عمومی در سطح سازمان، می‌تواند در روشن‌سازی افکار افراد نیروهای سازمان اثر شگرفی داشت.

پی‌نوشت

1- Jumby Bay Island
2- NPV
3- LCOE
4- Maximum Power Point Tracker (MPPT)
5- Wet Land
6- Analytic Hierarchy Process
7- Life Cycle Assessment
8- Fuzzy comprehensive evaluation method
9- Specific energy consumption
10- Unit energy consumption
11- Silver City
12- EPA
13- PPA
14- Greenskies
15- Ledyard
16- Net Metering
17- IBC Solar
18- PodTanks
۱۹- امور آب و فاضلاب

منابع

استفاده از انرژی خورشیدی برای تأمین نیاز برق تأسیسات در شرکت آبفای قم. ۱۳۹۶. پورتال انرژی خورشیدی.
http://www.pvportal.ir/en/node/401 (visited May 6, 2020)

استفاده از انرژی خورشیدی در تصفیه‌خانه آب خرم‌آباد. ۱۳۹۵. ایسنا.
https://www.isna.ir/news/95031715535/ (visited December 7, 2019)

امکان‌سنجی استفاده از انرژی‌های خورشیدی در تأسیسات شرکت آب و فاضلاب همدان و اجرای برخی کاربری‌ها. ۱۳۹۲. همدان.
https://ganj-old.irandoc.ac.ir/articles/715192

ایرنا. ۱۳۹۸. وزیر نیرو: ۵۱ درصد جمعیت شهری کشور تحت پوشش شبکه فاضلاب است. ایرنا. shorturl.at/gkvzR.

ایلنا. ۱۳۹۴. دو درصد برق کشور در آب و فاضلاب مصرف می شود. ایلنا.
https://www.ilna.news/fa/tiny/news-305112 (visited February 14, 2020)

بهره‌برداری از مرحله دوم نیروگاه خورشیدی ستاد مرکزی شرکت آب و فاضلاب. ۱۳۹۷. خبرگزاری صدا و سیما.
http://www.iribnews.ir/008xjo (visited December 7, 2019)

تولید ۲۰ کیلووات برق از انرژی خورشیدی ساختمان آبفای همدان. ۱۳۹۷. خبرگزاری فارس.
https://bit.ly/30u3j67 (visited December 7, 2019)

حسینی بیدار، س. ه. و متین پور، ب. ۱۳۹۷. امکان‌سنجی استفاده از پمپ‌های خورشیدی در صنعت آبفا (مطالعه موردی: شهر ازندریان استان همدان). دومین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران، انجمن آب و فاضلاب ایران-دانشگاه صنعتی اصفهان.

درگاه ملی آمار. ۱۳۹۵. مصرف برق به تفکیک بخش‌های مختلف. درگاه ملی آمار.
https://www.amar.org.ir/Portals/0/PropertyAgent/461/Files/6874/1301z120111395.xlsx (visited February 14, 2020)

دفتر انرژی سازمان آب و فاضلاب کشور. ۱۳۹۸الف. ترازنامه انرژی شرکت‌های آبفا روستایی. ۱۳۹۷. https://www.nww.ir/energy.

دفتر انرژی سازمان آب و فاضلاب کشور. ۱۳۹۸ب. ترازنامه انرژی شرکت‌های آبفا شهری. ۱۳۹۷. www.nww.ir/energy.

راه‌اندازی پنل خورشیدی در آبفای روستایی. ۱۳۹۷. خبرگزاری صدا و سیما.
http://www.iribnews.ir/0098i4 (visited December 7, 2019)

راه‌اندازی نیروگاه خورشیدی در تصفیه خانه فاضلاب جنوب تهران. ۱۳۹۷. وب‌سایت شرکت فاضلاب تهران.
https://ts.tpww.ir/fa/news/28305/ (visited May 11, 2020)

سلیمانی، م. م.و چابك، س. م. ۱۳۹۷. استفاده از نیروگاه هیبریدی برقابی و فتوولتاییك برای تأمین و فروش انرژی الکتریکی در صنعت آب. دومین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران. انجمن آب و فاضلاب ایران-دانشگاه صنعتی اصفهان.

صباح، س. و هوشیاری، ب. ۱۳۸۹. بررسی میزان کارایی و امکان‌سنجی کاربرد انرژی خورشیدی در تأسیسات آب و فاضلاب ایران. چهارمین همایش تخصصی مهندسی محیط‌زیست. دانشگاه تهران.

طراحی و اجرای نیروگاه خورشیدی متصل به شبکه به ظرفیت ۱۵۰۰۰ وات برای شرکت آب و فاضلاب منطقه ۳. ۱۳۹۰.
http://sbe-arshid.com/2011-11-23-19-48-227/company-news2/226-15-3 (visited December 7, 2019)

طرح برق‌دارکردن چاه‌های کشاورزی در سال ۹۹ اجرایی می‌شود. ۱۳۹۸. وزارت‌جهادکشاورزی.
https://www.maj.ir/Index.aspx?page_=dorsaetoolse-news&lang=1&sub=0&PageID=130467&PageIDF=0&tempname=main (visited November 5, 2020)

عملکرد شرکت‌های آبفا روستایی. ۱۳۹۷. ۱۳۹۸. www.nww.ir/energy.

عملکرد شرکت‌های آبفا شهری. ۱۳۹۷. ۱۳۹۸. www.nww.ir/energy.

فاضل، ع. ۱۳۹۱. بررسی امکان استفاده از انرژی‌های نو برای تأمین انرژی مورد نیاز ایستگاه‌های پمپاژ آب و فاضلاب استان آذربایجان شرقی. دانشگاه شهید مدنی آذربایجان.
https://ganj-old.irandoc.ac.ir/articles/587259

فهیمی‌نیا، م. ۱۳۹۰ بررسی وضعیت مدیریت فاضلاب شهری ایران." مجله سلامت و بهداشت اردبیل ۲(۳): ۴۰-۴۷.

قاسمی، م. ۱۳۹۴. گزارش مدیریت مصرف انرژی در صنعت آب و فاضلاب کشور. تهران، ایران.

متین پور، ب. و حسین زاده، ع. ۱۳۹۷. احداث و نصب نیروگاه خورشیدی به منظور کاهش هزینه‌ها (مطالعه موردی: شرکت آب و فاضلاب شهری استان همدان). دومین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران. انجمن آب و فاضلاب ایران-دانشگاه صنعتی اصفهان.

مجرد، ف. و مرادی، ک. ۱۳۹۳. نگرشی بر ناموزونی ها و روندهای ساعات آفتابی در ایران. جغرافیا و توسعه، ۱۵۳: ۳۴-۶۶.

مسافری، م. و مصداقی‌نیا، ندافی. ۱۳۸۱. مدیریت لجن تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری ایران در افق ۱۴۰۰. پنجمین همایش ملی بهداشت محیط. دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی ایران.

مرکز آمار ایران. ۱۳۹۹. "برآوردهای جمعیتی درگاه ملی آمار." درگاه ملی آمار. shorturl.at/bx267.

معاونت بررسی‌های اقتصادی اتاق بازرگانی تهران. ۱۳۹۷. چشم‌انداز جمعیت شهری و روستایی ایران تا سال ۲۰۵۰. تهران

وب‌سایت رسمی دفتر مدیریت مصرف انرژی و سیستم‌های کنترل. ۱۳۹۹. https://www.nww.ir/energy (visited May 6, 2020)

وب‌سایت سازمان انرژی‌های نو و تجدیدپذیر ایران. ۱۳۹۹. http://www.satba.gov.ir/ (visited May 6, 2020)

وحیدی، ج. واحدی، ا. وحیدی، ل. و علوی، س.ا. ۱۳۹۰. کاربرد انرژی خورشید و باد برای فرآوری پسماندهای شهری تصفیه خانه‌ها. دومین همایش بیوانرژی ایران (بیوماس و بیوگاز). تهران. ایران.

وضعیت تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری موجود در کشور. ۱۳۹۷. خبرگزاری مهر. https://www.mehrnews.com/news/4306266/ (visited May 11, 2020)

Ahmadi E., Benjamin M., Mohammadi-Ivatloo B. and Tezuka T. 2020. The Role of Renewable Energy Resources in Sustainability of Water Desalination as a Potential Fresh-Water Source: An Updated Review. Sustainability (Switzerland), 12(13)5233: 1-31.

Arashiro L. T., Montero N. Ferrer I., Gabriel Acién F., Gómez C. and Garfí A. 2018. Life Cycle Assessment of High Rate Algal Ponds for Wastewater Treatment and Resource Recovery. Science of The Total Environment, 622–623: 1118–30.

Azevedo F. 2014. Renewable Energy Powered Desalination Systems: Technologies and Market Analysis. University of Lisbon.

Beca P. 2015. Report Opportunities for Renewable Energy in the Australian Water Sector.

Bukhary S., Jacimaria B. and Sajjad A. 2020. An Analysis of Energy Consumption and the Use of Renewables for a Small Drinkingwater Treatment Plant. Water (Switzerland), 12(1)28: 1-21.

Chawaga P. 2017. Wastewater Facilities Make Solar Power Strides. Water Online Magazine. https://www.wateronline.com/doc/wastewater-facilities-make-solar-power-strides-0001 (visited June 5, 2020)

Day D. 2010. Solar Proves Its Power. TPO. https://www.tpomag.com/editorial/2010/04/solar-proves-its-power.

Energy Efficiency in Water and Wastewater Facilities. A Guide to Developing and Implementing Greenhouse Gas Reduction Programs. 2013. U.S. Environmental Protection Agency. United States.

Eva P. B. 2019. Floating Solar. WaterWorld Magazine. https://www.waterworld.com/home/article/14071045/floating-solar (visited June 5, 2020).

Fadhil Y.A. and M. El-Halwagi M. 2018. An Integrated Approach to Water-Energy Nexus in Shale-Gas Production. Processes, 6(5)52: 2-25.

Foteinis S., Jose M., Monteagudo A. D. and Efthalia Ch. 2018. Environmental Sustainability of the Solar Photo-Fenton Process for Wastewater Treatment and Pharmaceuticals Mineralization at Semi-Industrial Scale. Science of The Total Environment 612: 605–12.

Guo Z., Yongjun Sun Sh., Yuan P. and Pen Ch. Ch. 2019. Integration of Green Energy and Advanced Energy-Efficient Technologies for Municipal Wastewater Treatment Plants. International Journal of Environmental Research and Public Health, 16(7): 1–29.

Han Ch., Liu J., Liang H., Guo X. and Li L. 2013. An Innovative Integrated System Utilizing Solar Energy as Power for the Treatment of Decentralized Wastewater. Journal of Environmental Sciences, 25(2): 274–79.

Hervas B., Estefanía M., Pitarch E., Navarro P. and José M. 2017. Optimal Sizing of a Heat Pump Booster for Sanitary Hot Water Production to Maximize Benefit for the Substitution of Gas Boilers. Energy, 127: 558–70.

Hudnell H. K., Green D., Vien R., Butler S. and Rahe G. 2011. Improving Wastewater Mixing and Oxygenation Efficiency with Solar-Powered Circulation. Clean Technologies and Environmental Policy, 13(5): 731–42

IBC SOLAR Energy Is Going to Implement Solar Drinking Water Supply in Hanoi. 2020. IBC Solar Official Website. https://www.ibcsolar.com/corporate/press/article/news/detail/News/ibc-solar-energy-is-going-to-implement-solar-drinking-water-supply-in-hanoi/ (visited June 5, 2020).

IEA. 2019. World Energy Outlook 2019. Paris. International Energy Agency.

Irena. 2016. Irena Solar Pv in Africa: Costs and Market.

Jones L.E. and Gustaf O. 2017. Solar Photovoltaic and Wind Energy Providing Water. Global Challenges, 1(5): 1600022.

Khan Mamun R., Kurny A. S. W. and Gulshan F. 2017. Parameters Affecting the Photocatalytic Degradation of Dyes Using TiO2: A Review. Applied Water Science 7(4): 1569–78.

Laura Maeso Velasco, and Udo Gattenlöhner. 2019. Solar Energy Supply for a Wastewater Treatment Plant in Jordan. https://www.globalnature.org/en/wastewater-treatment-plant-jordan (visited May 6, 2020).

Luboschik U. 1999. Solar Sludge Drying—Based on the IST

Nexus. Global Green Growth Institute.

Shouman E., Sorour R. M. H., and Abulnour A. G. 2015. Economics of Renewable Energy for Water Desalination in Developing Countries. Journal of Engineering Science and Technology Review, 8(5): 227–31.

Solar Electricity Powers the Wastewater Treatment Plant. 2019. http://www.townofsilvercity.org/r/town_of_silver_city_NM.php?r=67,femgc (visited December 7, 2019).

Solar E.. 2019. Greenskies Installs Solar Array for Middletown Water Treatment Facility. https://elitesolarpros.com/2019/06/03/middletown-water-treatment-solar/ (visited June 5, 2020).

Solar Energy for Water Treatment | Meeco. 2019. https://www.meeco.net/references/residential/pv-energy-for-water-treatment (visited May 4, 2020).

Strazzabosco A., Kenway S.J. and Lant P.A. 2019. Solar PV Adoption in Wastewater Treatment Plants: A Review of Practice in California. Journal of Environmental Management, 248: 109337.

Taha M. and Rashed A. 2017. Potential Application of Renewable Energy Sources at Urban Wastewater Treatment Facilities in Palestine – Three Case Studies. Desalination and Water Treatment, 94: 64–71.

United Nations Sustainable Development. 2019. https://www.un.org/sustainabledevelopment/ (visited May 4, 2020).

Valero D., Ortiz J.M., Expósito E., Montiel V. and Aldaz A. 2010. Electrochemical Wastewater Treatment Directly Powered by Photovoltaic Panels: Electrooxidation of a Dye-Containing Wastewater. Environmental Science & Technology, 44(13):5182–87.

Waste Water Sewage Treatment Plants - PodTanks Sewage Systems. 2020. PodTanks Official Website.

https://www.podtanks.com/solar_powered_sewage_treatment_plant.html (visited June 5, 2020).

Wastewater Treatment Facility Solar Electric System. 2020. City of Boulder Colorado Official Website. https://bouldercolorado.gov/water/wastewater-treatment-facility-solar-electric-system (visited June 5, 2020).

Water Treatment Plants Powered by Renewable Energies. 2020. Imnovation. https://www.imnovation-hub.com/water/water-treatment-plants-powered-by-renewable-energies/ (visited May 4, 2020).

Xu J., Li Y., Wang H., Wu J., Wang X. and Li F. 2017. Exploring the Feasibility of Energy Self-Sufficient Wastewater Treatment Plants: A Case Study in Eastern China. Energy Procedia 142: 3055–61.

Process. Renewable Energy 16(1): 785–88.

Ludt B. 2019. Greenskies Finishes 137-KW Solar Array at Water Treatment Plant. Solar Power World. https://www.solarpowerworldonline.com/2019/05/greenskies-finishes-137-kw-solar-array-at-water-treatment-plant/.

Lynch N. 2015. Solar Panels Proposed for Power Generation at Ledyard Wastewater Treatment Site. The Day. https://www.theday.com/article/20151202/NWS01/151209805 (visited June 5, 2020).

Mahmoodi, V., Rohani Bastami T. and Ahmadpour A. 2018. Solar Energy Harvesting by Magnetic-Semiconductor Nanoheterostructure in Water Treatment Technology. Environmental Science and Pollution Research, 25(9): 8268–85.

Mathioudakis V L. Kapagiannidis A.G. Athanasoulia E. Diamantis V.L. Melidis P. and Aivasidis A. 2009. Extended Dewatering of Sewage Sludge in Solar Drying Plants. Desalination, 248(1): 733–39

Olsson G. 2015. Water and Energy: Threats and Opportunities. second editation. IWA Publishing.

PV Solutions for Supplying Drinking Water. 2019. https://www.pveurope.eu/News/Solar-Generator/PV-solutions-for-supplying-drinking-water (visited May 4, 2020).

Reforming Energy Subsidies Could Curb India's Water Stress. 2019. World Watch Institute. www.worldwatch.org/reforming-energy-subsidiescould-%0Acurb-india's-water-stress-0 (visited May 4, 2020).

Renewable Energy in the Water, Energy & Food Nexus. 2015. IRENA. https://www.irena.org/publications/2015/Jan/Renewable-Energy-in-the-Water-Energy--Food-Nexus (visited May 4, 2020).

Richards B.S. and Andrea I. S. 2009. Chapter 12. In Sustainable Water for the Future-Water Recycling versus Desalination.

Rodríguez, R et al. 2018. Life Cycle Assessment and Techno-Economic Evaluation of Alternatives for the Treatment of Wastewater in a Chrome-Plating Industry. Journal of Cleaner Production, 172: 2351–62.

Rosa-Clot M., Giuseppe M. and Sandro N. 2017. Floating Photovoltaic Plants and Wastewater Basins: An Australian Project. Energy Procedia 134: 664–74.

Sharma G. J. Choi H., Shon K., and Phuntsho S. 2011. Solar-Powered Electrocoagulation System for Water and Wastewater Treatment. Desalination and Water Treatment 32(1–3): 381–88.

Shim H. S. 2017. Solar-Powered Irrigation Pumps in India — Capital Subsidy Policies and the Water-Energy Efficiency