



تحقیقات آب و خاک ایران | دوره ۵۳ | شماره ۲ | اردیبهشت ۱۴۰۱ (ص ۲۸۶-۲۷۷)

DOI: <https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2022.336067.669168>

(مقاله علمی - پژوهشی)

Evaluation of Photovoltaic Reverse Osmosis Desalination System (PV-RO), Case Study: Suburban Villages of Fars Province, Shiraz

SHAHDAD KAMFIROOZI¹, REZVAN TALEBNEJAD^{2*}

1. Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University (TMU), Tehran, Iran.
2. Water Engineering Department and Drought Research Center, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran.
(Received: Dec. 24, 2021- Revised: Jan. 22, 2022- Accepted: Feb. 27, 2022)

ABSTRACT

The reduction of renewable and fresh water resources has resulted in a drinking water supply deficit in many parts of Iran, including Fars province. Considering that most of the water resources in Fars province and the suburbs of Shiraz city have become saline, one of the efficient solutions to supply drinking water to people living in villages with limited population is desalination. In this research, a photovoltaic reverse osmosis desalination system (PV-RO) was designed and built. Three saline water samples from; Zarghan Agricultural Research Center, Sultanabad village, and Kamalabad village were collected for evaluation of the desalination system in 2021. The results showed that it is possible to supply daily drinking water of 10 liters per capita for 146 people in the first study area, 122 people in the second area, and 50 people in the third area. The maximum flow rate of permeate water production is 61 L/h with a 41% recovery factor. Moreover, the required energy for desalination is 1.98 kWh/m³, and the permeate water production cost per cubic meter of fresh water is determined as 180,000 Rials. Therefore, it is possible to use this system in the study area to supply drinking water under drought conditions with reasonable efficiency.

Keywords: Drinking Water, Reverse Osmosis Desalination Efficiency, Solar Energy.

ارزیابی سامانه نمک‌زدایی غشایی خورشیدی (PV-RO)، مطالعه موردی: روستاهای حومه استان فارس، شهرستان شیراز

شهادت کامفیروزی^۱، رضوان طالب نژاد^{*۲}

۱. گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲. بخش مهندسی آب و مرکز مطالعات خشک‌سالی دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۳ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۱/۲ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱۲/۸)

چکیده

کاهش منابع آب تجدیدپذیر و خشک‌سالی، بسیاری از نقاط ایران از جمله استان فارس را با بحران جدی تأمین آب شرب روبه‌رو کرده است. باتوجه‌به اینکه بسیاری از منابع آبی موجود در سطح استان فارس و حومه شهرستان شیراز از نظر کیفیت به حالت لب‌شور درآمده است، یکی از راه‌حل‌های کارآمد به‌منظور تأمین آب شرب افراد ساکن روستاها با جمعیت محدود در این مناطق، نمک‌زدایی است. در این تحقیق، یک سامانه نمک‌زدایی غشایی خورشیدی (PV-RO) در سال ۱۳۹۹، طراحی و ساخته شد و به‌منظور ارزیابی آن از سه منطقه؛ مرکز تحقیقات کشاورزی زرقان، روستای سلطان‌آباد و روستای کمال‌آباد نمونه آب جمع‌آوری گردید. نتایج نشان داد، امکان تأمین آب شرب روزانه ۱۴۶ نفر در منطقه اول مورد مطالعه، ۱۲۲ نفر در منطقه دوم و ۵۰ نفر نیز در منطقه سوم با احتساب نیاز ۱۰ L/day برای هر فرد وجود دارد. بیشینه دبی تولید آب شیرین ۶۱ L/h با درصد بازیافت ۴۱٪ و انرژی موردنیاز به‌ازای یک مترمکعب آب شیرین ۱/۹۸ kWh/m³ است و در نهایت هزینه تولید هر مترمکعب آب شیرین برابر ۱۸۰،۰۰۰ ریال تعیین شد؛ بنابراین امکان کاربرد این سامانه در منطقه مورد مطالعه جهت تأمین آب شرب در شرایط خشک‌سالی با راندمان مطلوب وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: آب شرب، راندمان نمک‌زدایی غشایی، انرژی خورشیدی

مقدمه

در حال حاضر، تخمین زده می‌شود ۳/۶ میلیارد نفر (حدود نیمی از جمعیت جهانی) حداقل در مدت یک ماه در سال در مناطقی که دچار کمبود آب هستند زندگی می‌کنند و پیش‌بینی می‌شود این تعداد تا سال ۲۰۵۰ به ۵/۷-۴/۸ میلیارد افزایش یابد (Water, 2018). بخش عمده‌ای از مناطق کشور ایران دارای شرایط آب و هوایی خشک و نیمه‌خشک هستند. با کاهش بارش و استفاده نامناسب از منابع آب شیرین سطحی و زیرزمینی، دسترسی به آب شیرین در شرایط خشک‌سالی را به یک بحران جدی اجتماعی تبدیل کرده است. از این جهت استفاده از منابع آب‌شور و نامتعارف و فرآیندهای نمک‌زدایی به‌عنوان یکی از راهکارهای مهم برای مقابله با بحران آب مورد توجه محققین و برنامه‌ریزان قرار گرفته است (Abdelkareem et al., 2018; Shatat & Riffat, 2014; Shawky et al., 2015).

کمبود منابع آبی از یک سو و افزایش تقاضا از سویی دیگر دسترسی به منابع آب و استفاده از آن را به نوعی رقابت بین افراد

تبدیل کرده است (Bijani & Hayati, 2015; Madani, 2014).

نمک‌زدایی به‌طور گسترده در خاورمیانه، کشورهای عربی، آمریکای شمالی، آسیا، اروپا، آفریقا، آمریکای مرکزی، آمریکای جنوبی و استرالیا برای تأمین آب شیرین به کار می‌رود. هزینه انرژی مصرفی در سامانه نمک‌زدایی برای تولید ۱۰۰۰ m³/day آب شیرین معادل هزینه ۱۰،۰۰۰ بشکه نفت در سال گزارش شده است (Kalogirou, 2005). در سامانه‌های نمک‌زدایی استفاده از صورت‌های مختلف انرژی امری اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. استفاده از سوخت‌های فسیلی به‌عنوان یک منبع تأمین توان، موجب افزایش گازهای گلخانه‌ای شده و اثرات سوء زیست‌محیطی را به همراه خواهد داشت، همچنین در مناطق دور از دسترس روستایی، امکان تأمین و بهره‌برداری از این منابع انرژی با مشکلات بسیاری همراه خواهد بود. در حالیکه، کشور ایران به خصوص استان فارس، پتانسیل بالایی نیز در دریافت انرژی خورشیدی دارد و اجرای طرح‌های خورشیدی را امکان‌پذیر می‌کند (Almutairi et al., 2021; Assadi et al., 2022) لذا،

که از حقوق اولیه اجتماعی است در دسترس افراد باشد. تأمین انرژی در مناطق با جمعیت محدود نیز خود با چالش‌های بسیار همراه است. نتایج تحقیق‌های انجام شده در گذشته با هدف نمک‌زدایی خورشیدی باتوجه به کیفیت آب و پتانسیل دریافت انرژی خورشیدی در منطقه‌ای خاص ارائه شده است، بنابراین به‌منظور سرمایه‌گذاری و برنامه‌ریزی در راستای حل بحران کمبود منابع آب شیرین نیاز است به‌صورت موردی، مناطق خاصی از نظر انرژی تابشی دریافتی و عملکرد سامانه نمک‌زدایی خورشیدی ارزیابی گردد؛ لذا، در این تحقیق با بهره‌گیری از انرژی خورشیدی و ماژول‌های PV و نمک‌زدایی RO تلاش شده است که آب شرب با کمیت و کیفیت موردنیاز برای مناطق با ویژگی‌های مذکور تهیه شود. برای رسیدن به این مهم یک سامانه نمک‌زدایی RO مبتنی بر انرژی خورشیدی طراحی و ساخته شد و به‌منظور ارزیابی سامانه از سه‌نقطه استان فارس و حومه شهرستان شیراز نمونه آب‌شور از منابع آب زیرزمینی در هر منطقه تهیه و پتانسیل سامانه ساخته شده برای تأمین آب شیرین مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

تعیین سامانه نمک‌زدایی غشایی

باتوجه به ارزیابی‌های میدانی انجام شده و نمونه‌برداری از آب‌های اطراف شهرستان شیراز، اطلاعات کلی از کیفیت آب و سطح شوری منابع آب چاه‌ها جمع‌آوری شد. به‌طور کلی سطح شوری آب در اغلب نقاط به‌طور متوسط در محدوده 2500 mg/L و به حالت لب‌شور درآمده است. محدوده شوری آب در دسترس، اجزای سامانه نمک‌زدایی RO با در نظر گرفتن میزان آب شیرین موردنیاز جهت تأمین آب شرب 120 نفر (10 L/person) انتخاب گردید. باتوجه به موارد مذکور و نمونه‌های فیلتر غشایی موجود در بازار، فیلتر AP-2012-100 با ظرفیت 100 gallon/day انتخاب و باتوجه به دبی حجمی آب شیرین موردنیاز و کیفیت استاندارد آن از چهار فیلتر غشایی با آرایش دوه‌دو سری انتخاب گردید. سپس باتوجه به مشخصات فیلترهای RO و فشار کاری توصیه شده توسط شرکت سازنده، از دو پمپ دیافراگمی فشار بالا با بیشینه فشار 140 psi استفاده شد به‌طوری‌که هر پمپ فشار یکی از خطوط فیلترهای غشایی سری شده را تأمین کرد. در جدول ۱ مشخصات اجزای به‌کاررفته در سامانه نمک‌زدایی غشایی ذکر شده است.

تعیین اندازه ماژول‌های PV

نمک‌زدایی با استفاده از انرژی خورشید راه حلی مناسب برای بهره‌برداری از آب‌های شور جهت تأمین بخشی از کمبود منابع آب و همچنین کاهش اثرات نامطلوب زیست‌محیطی ناشی از کاربرد سوخت‌های فسیلی است. از میان فناوری‌های نمک‌زدایی، نمک‌زدایی غشایی یا اسمز معکوس^۱ (RO) کارآمدترین و قابل اعتمادترین روش است (Qasim et al., 2019) و بیش از 65% سامانه‌های نمک‌زدایی در سراسر دنیا از روش RO به‌منظور نمک‌زدایی استفاده می‌کنند (Burn et al., 2015). به‌طور کلی انرژی موردنیاز در استفاده از روش RO در حدود 4 kWh به‌ازای هر مترمکعب آب گزارش شده است (Tzen & Morris, 2003). بیشتر کارخانه‌های نمک‌زدایی RO برای تأمین توان موردنیاز از ماژول‌های فتوولتاییک (PV^۲) استفاده می‌کنند. کاربرد انرژی خورشیدی در مقایسه با انرژی حرارتی، هزینه تولید به‌ازای هر مترمکعب آب شیرین را کاهش می‌دهد (Childs et al., 1999). در تحقیقی، هزینه نمک‌زدایی به‌ازای هر مترمکعب آب در 21 کارخانه واقع در شمال آفریقا مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد هزینه تولید به‌ازای هر مترمکعب آب شیرین تابعی از ظرفیت تولید کارخانه است و با افزایش ظرفیت تولید کارخانه میزان انرژی موردنیاز تأمین شده توسط ماژول‌های PV کاهش می‌یابد و در نهایت منجر به کاهش هزینه تولید به‌ازای هر مترمکعب آب شیرین می‌شود (Lamei et al., 2008). در تحقیقی با هدف نمک‌زدایی از آب دریا با ظرفیت تولید سه m^3/day از ماژول‌های فتوولتاییک با توان $4/8 \text{ kW}$ استفاده شد. متغیرهای عملکردی این کارخانه نمک‌زدایی در محدوده فشار خوراک 45 تا 63 bar مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد با فشار ورودی 45 bar ، نیاز است این کارخانه $6/5 \text{ h/day}$ کار کند تا $0/8 \text{ m}^3/\text{day}$ آب شیرین باکیفیت 450 mg/L و با مصرف انرژی $16/3 \text{ kW h/m}^3$ تولید شود (Herold & Neskakis, 2001). در تحقیقی، با استفاده از ماژول‌های PV با ظرفیت دو kW یک کارخانه نمک‌زدایی مبتنی بر روش RO تأمین توان شد. با استفاده از نرم‌افزار ROSA یک واحد نمک‌زدایی RO طراحی و سطح شوری آب ورودی 2000 mg/L و کیفیت مطلوب آب شیرین تولیدی نیز کمتر از 50 mg/L در نظر گرفته شد. نتایج آزمون‌های تجربی نشان داد، انرژی موردنیاز برای تولید $5/1 \text{ m}^3/\text{day}$ ، آب شیرین برابر 1 h/m^3 خواهد بود (Alghoul et al., 2016).

کشور ایران و به‌ویژه استان فارس دچار بحران کمبود منابع آب شیرین است به‌منظور کاهش تخلیه روستاها، افزایش شهرنشینی و حاشیه‌نشینی در کلان‌شهرها نیاز است که آب شرب

طبق رابطه ۲ محاسبه شد (Khatib et al., 2016).

$$C_{Wh} = \frac{E_L D_{Autonomous}}{V_B \eta_B DOD} \quad (\text{رابطه ۲})$$

در این رابطه $D_{Autonomous}$ ، V_B ، η_B و DOD به ترتیب تعداد روزهای ابری (در این تحقیق ۰/۵ در نظر گرفته شده است)، ولتاژ باتری (۱۲ V)، بازدهی باتری (۰/۸۵) و نرخ عمق تخلیه شارژ باتری (۰/۶) است. با جایگذاری در رابطه ۲ و در نظر گرفتن ضریب اطمینان ۱/۲ ظرفیت برابر ۱۰۰ Ah انتخاب گردید.

مشخصات سامانه PV-RO

در این تحقیق یک سامانه نمکزدایی غشایی مجهز به ماژول‌های PV با هدف تأمین آب شرب یک روستای کم‌جمعیت با فرض ۳۰ خانوار (هر خانوار چهار نفر) در مرکز مطالعات خشک‌سالی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز طراحی و ساخته شد. مرکز مطالعات خشک‌سالی در منطقه باجگاه واقع در ۱۶ کیلومتری شمال شیراز با طول جغرافیایی $52^{\circ}32'E$ و عرض جغرافیایی $29^{\circ}36'N$ و در ارتفاع ۱۸۱۰ متری از سطح دریای آزاد واقع شده است. این سامانه نمکزدایی از فیلترهای پیش تصفیه و غشایی، پمپ‌های فشار بالا، شیرهای برقی، فشارسنج، روتامتر، یک واحد کنترل الکترونیک و سیم‌کشی‌های موردنیاز برای برق قدرت و فرمان آن تشکیل شده که در شکل ۱ نمایی از سامانه PV-RO نمایش داده شده است.

به‌منظور تأمین توان سامانه نمکزدایی RO ابتدا نیاز به تعیین اجزای مصرف‌کننده، نوع برق مصرفی (AC/DC)، ساعات کارکرد و همچنین توان مصرفی هر کدام از اجزای مصرف‌کننده‌ها است. باتوجه به اینکه سامانه نمکزدایی ساخته شده با هدف بهره‌برداری در مناطق و روستاهای دور از دسترس طراحی شده است لذا، به‌صورت یک سامانه تأمین خورشیدی منفصل از شبکه^۱ طراحی و ساخته شد. با در نظر گرفتن رابطه ۱ توان موردنیاز ماژول PV (P_{PV}) تعیین شد (Khatib et al., 2016):

$$P_{PV} = \frac{E_L}{\eta_{sys} PSH} S_f \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این رابطه E_L ، η_{sys} ، S_f و PSH به ترتیب انرژی موردنیاز روزانه، بازدهی اجرای سامانه (۰/۷۷)، ضریب اطمینان (۱/۴) و میانگین تابش روزانه قله برای موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در شهرستان شیراز برابر $(4/5 \text{ kWh/m}^2 \text{ day})$ است. باتوجه به توان مصرفی اجزای سامانه نمکزدایی RO از جمله پمپ‌های فشار بالا که بیشینه توان مصرفی را به خود اختصاص می‌دهند انرژی موردنیاز (E_L) برابر 180 Wh در نظر گرفته شد. با فرض شش ساعت کارکرد دستگاه در روز، توان موردنیاز تولید شده توسط ماژول‌های PV برابر 436 W است. در نهایت نیز با انتخاب ماژول PV با بیشینه توان 270 W به دو عدد ماژول PV با بیشینه توان ذکر شده نیاز است. در این سامانه ظرفیت موردنیاز باتری‌ها (C_{Wh}) به‌منظور پشتیبانی از سامانه RO



شکل ۱- نمایی از سامانه PV-RO ساخته شده و اجزای آن

تصفیه و دهانه مکش پمپ‌های فشار بالا در سامانه تأمین شود. قسمت پیش تصفیه شامل سه مرحله بوده که در مراحل اول و

خوراک‌دهی به سامانه از طریق یک پمپ اولیه انجام شده است تا فشار اولیه موردنیاز برای عبور جریان از فیلترهای پیش

نمونه آب از چاه جمع‌آوری شد. موقعیت جغرافیایی چاه‌های مذکور در شکل ۲ ارائه شده است. تجزیه شیمیایی نمونه آب‌های موردنظر به تفکیک در جدول ۲ ارائه شده است.

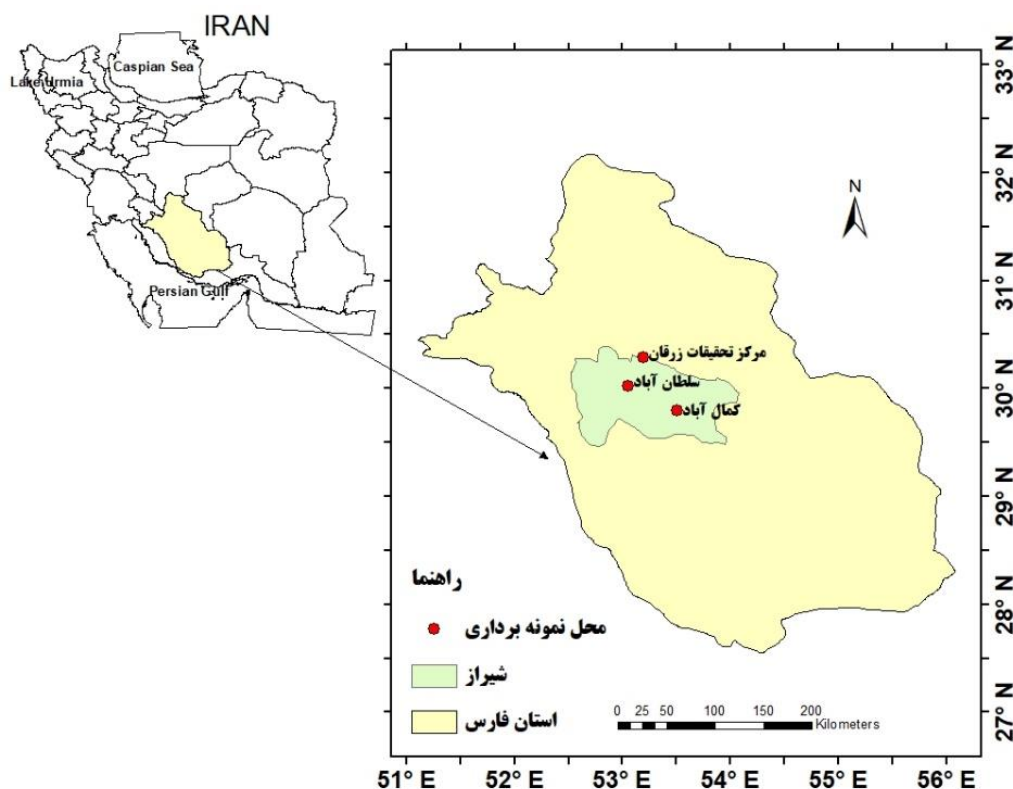
جدول ۱- معرفی قطعات به‌کاررفته در سامانه PV-RO.

عنوان	توضیحات
مخزن آب شور	حجم ۱۰۰ L
مخزن آب شیرین	حجم ۱۰۰ L
پمپ اولیه تأمین فشار	جریان DC، دبی حجمی ۴ L/min و فشار بیشینه ۱۰۰ psi
پمپ فشار بالا	جریان DC، دبی حجمی ۴ L/min و فشار بیشینه ۱۵۰ psi
فیلترهای غشایی (ممبران)	ظرفیت ۱۰۰ gallon/day
روتامتر	دبی حجمی از ۴۰ تا ۴۰۰ L/h
فشارسنج	فشار کاری صفر تا ۱۴۰ psi
فیلترهای پیش تصفیه	دو فیلتر البافی و یک فیلتر کربن به قطر ۲۰ in
باتری خورشیدی	۱۲ V، ۴۲ Ah
واحد کنترل الکترونیک	تشکیل شده از کنترل شارژ خورشیدی و مدارهای قدرت و فرمان
ماژول PV	ماژول پلی کریستالین با بیشینه توان ۲۷۰ W

سوم از فیلتر البافی و در مرحله دوم از یک فیلتر کربن فعال استفاده شده است. برای تأمین فشار فیلترهای غشایی از دو پمپ فشار بالا استفاده شده است که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. فیلترهای غشایی شامل چهار عدد فیلتر با ظرفیت ۱۰۰ گالن در روز است که دوبه‌دو با یکدیگر موازی بوده و توسط پمپ‌های فشار بالا تغذیه می‌شوند. در مسیر آب شیرین خروجی از فیلترهای غشایی به سمت مخزن ذخیره آب شیرین، یک روتامتر به‌منظور پایش دبی حجمی آب شیرین تعبیه شده است. سامانه خورشیدی از دو ماژول PV بدون ردیاب که تحت زاویه ۳۰ درجه در راستای شرقی-غربی و به سمت جنوب قرار گرفته‌اند، باتری و کنترل شارژ تشکیل شده است. ماژول‌ها به‌صورت موازی و باتری‌ها نیز به‌صورت سری به یکدیگر متصل شده و برق موردنیاز سامانه PV-RO که برق مستقیم (DC) است را تأمین می‌کند.

ارزیابی سامانه PV-RO

به‌منظور ارزیابی سامانه PV-RO، به‌صورت میدانی از سه منطقه روستایی اطراف شهرستان شیراز که با مشکل شوری آب زیرزمینی و کمبود منابع آب شیرین روبه‌رو هستند، ۱۰۰ لیتر



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی محل‌های نمونه‌برداری

جدول ۲- تجزیه شیمیایی آب از مناطق مورد مطالعه

T.A mg/L	T.H mg/L	S.A.R	پتاسیم mg/L	سدیم mg/L	منیزیم mg/L	کلسیم mg/L	سولفات mg/L	کلرید mg/L	بی کربنات mg/L	pH	T.D.S mg/L	هدایت الکتریکی μS/cm	محل نمونه
۳۶۵	۱۷۵۰	۳/۴۱	۵/۴۶	۳۲۸/۲۱	۳۰۰	۲۰۰	۸۶۴	۲۶۶/۲۵	۴۴۵/۳	۸/۲	۲۴۰۹	۳۲۹۰	۱
۲۸۵	۲۲۵۰	۳/۷	۶/۲۴	۴۰۳/۸۸	۳۶۰	۳۰۰	۱۲۲۴	۵۳۲/۵	۳۴۷/۷	۸/۱	۳۱۷۴	۴۷۵۷	۲
۲۲۰	۵۲۵۰	۱۲/۷۷	۴۲/۹	۲۱۲۷/۵	۸۱۰	۷۵۰	۲۲۰۸	۳۱۰۶/۳۵	۲۶۸/۴	۷/۸	۹۳۱۳	۱۴۷۱۴	۳

روتامتر اندازه‌گیری و همچنین به منظور صحت سنجی به روش حجمی نیز تعیین گردید. سپس شاخص‌های ارزیابی سامانه شامل درصد بازیافت^۲ و فاکتور تغلیظ^۳ از رابطه ۳ و ۴ تعیین شد.

$$R = \frac{Q_P}{Q_F} \times 100 \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در این رابطه R ، Q_P و Q_F به ترتیب درصد بازیافت، دبی آب شیرین و دبی خوراک (آب شور ورودی) است.

$$C_p = \frac{1}{1 - R} \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در این رابطه C_p فاکتور تغلیظ است و بر اساس درصد بازیافت تعیین گردید.

در نهایت نیز قیمت آب شیرین تولید شده در هر سه منطقه به‌ازای هر مترمکعب آب شیرین تولیدی با توجه به هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های سالانه بهره‌برداری از سیستم (جدول ۶) محاسبه و مقایسه گردید.

نتایج و بحث

طبق نتایج ارائه شده، کیفیت آب شیرین تولید شده و شورابه توسط سامانه PV-RO با توجه به مجموع نمک‌های حل شده در آب بر حسب mg/L در جدول ۳ ارائه شده است. سطح شوری آب شیرین تولیدی از مناطق مورد مطالعه از کیفیت مناسبی برای شرب، طبق استاندارد سازمان بهداشت جهانی (WHO) برخوردار بوده است و سامانه نمک‌زدایی PV-RO توانسته است آب شیرین با دبی حجمی قابل قبول را تأمین کند. با افزایش سطوح شوری از ۱۴ mg/L به ۳۱۷۴، دبی آب شیرین و شورابه به ترتیب ۱۴ و ۵٪ کاهش یافت. در حالی که کیفیت آب شیرین تولیدی به طور تقریبی در یک سطح بوده است. افزایش ۷۶۵ mg/L سطح شوری در نمونه دوم کیفیت شورابه حاصل از آن را ۲۰٪ نسبت به نمونه اول کاهش داده است. نمونه آب در منطقه سوم مورد مطالعه (روستای کمال آباد) با توجه به قرارگیری در پایین دست دریاچه مهارلو شهرستان شیراز دارای سطح شوری بالایی است. در این حالت دبی آب شیرین تولید شده با کاهش ۶۲٪ نسبت به منطقه یک، به ۲۱ L/h رسیده است. دبی شورابه حاصل نیز نسبت به

محل نمونه شماره یک واقع در مرکز تحقیقات زرقان، در محدوده کیلومتر ۱۵ اتوبان شیراز-اصفهان قرار گرفته است. برداشت از چاه مذکور به منظور زراعت با هدف تحقیقات کشاورزی انجام می‌گیرد که به‌طور کلی با توجه به کاهش کیفیت آب از کمیت و کیفیت محصولات نیز کاسته شده است. محل نمونه شماره دو واقع در روستای سلطان‌آباد، در محدوده کمربندی شیراز (بزرگراه امام خمینی) قرار گرفته است. منطقه مذکور دارای چاه‌های متعدد است که عمدتاً دارای آب لب‌شور هستند و مناسب برای آشامیدن نیست و با توجه به سطح معیشت و کیفیت زندگی افراد ساکن دسترسی آسان به آب شرب وجود ندارد. محل نمونه شماره سه واقع در روستای کمال آباد، در محدوده کیلومتر ۹۴ اتوبان شیراز - بندرعباس قرار گرفته است. منطقه مورد نظر دارای چاه با سطح شوری بالا است که امکان استفاده به‌عنوان آب شرب و همچنین مصارف صنعتی و کشاورزی وجود ندارد. با توجه به کیفیت آب چاه‌های منطقه، عمده کشت و زراعت به سمت درخت‌کاری از انواع مقاوم به شوری مانند درخت پسته تغییر پیدا کرده است. مناطق مذکور در اطراف شهرستان شیراز به‌عنوان محل نمونه‌برداری بر اساس مشکلات این مناطق در دسترسی به آب شرب مطلوب شناسایی و انتخاب گردید.

با توجه به تهیه نمونه آب از چاه‌های مناطق مورد نظر، آزمایش‌ها با سه تکرار در مرکز مطالعات خشک‌سالی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز در اسفندماه سال ۱۳۹۹ انجام شد و مدت‌زمان هر آزمایش برای سطح شوری مشخص ۳۰ دقیقه در نظر گرفته شد. آزمایش‌ها در محدوده ساعت ۱۲:۰۰ تا ۱۵:۰۰ انجام گرفت. در این پژوهش از فیلترهایی که ۶ ماه از کاربرد آن‌ها در سطح شوری مجاز بهره‌برداری، گذشته بود استفاده گردید. پس از شروع کار سامانه و عبور آب‌شور، مدت‌زمانی جهت پایداری وضعیت سامانه در نظر گرفته شد و سپس نمونه آب شیرین و شورابه جهت تعیین شوری برداشت و به‌وسیله شوری سنج مدل Lutron WA-2017SD اندازه‌گیری و کل نمک‌های محلول در آب (TDS) بر حسب mg/L گزارش گردید. در این تحقیق دبی آب تغلیظ یافته به روش حجمی در سه تکرار و دبی آب شیرین با

منطقه یک مورد مطالعه (سلطان‌آباد) افزایش ۱۰٪ داشته است.

جدول ۳- غلظت املاح و دبی آب شیرین و آب تغلیظ یافته در سطوح مختلف شوری خوراک

شوری آب خوراک (mg/L)	غلظت املاح (mg/L)		دبی (L/h)	
	آب شیرین	آب تغلیظ یافته	آب شیرین	آب تغلیظ یافته
۲۴۰۹	۷۵	۳۵۲۸	۵۵	۷۹
۳۱۷۴	۱۱۰	۴۴۳۰	۴۷	۷۵
۹۳۱۳	۶۹۰	۱۴۷۵۰	۲۱	۸۷

دوم نسبت به منطقه یک، باعث کاهش ۴٪ فاکتور تغلیظ شده است و تأثیر معناداری بر روی درصد بازیافت سامانه نمک‌زدایی PV-RO نداشته است. از سوی دیگر درصد بازیافت و فاکتور تغلیظ در منطقه سوم نسبت به منطقه یک به ترتیب ۵۴٪ و ۲۷٪ کاهش یافته است. سامانه PV-RO ساخته شده با توجه به اهمیت تأمین انرژی الکتریکی از ماژول‌های PV، از نظر مصرف انرژی الکتریکی به‌ازای هر مترمکعب آب شیرین مورد ارزیابی قرار گرفت. کمینه مصرف انرژی (SEC) به‌ازای تولید هر مترمکعب آب شیرین در سطح شوری ۲۴۰۹ mg/L، ۱/۹۸ kWh/m³ است که این میزان با افزایش سطح شوری آب ورودی با توجه به اینکه به فشار بالاتر در فرآیند RO نیاز است، افزایش خواهد یافت. بیشینه مصرف انرژی در منطقه سوم مورد مطالعه به‌ازای یک مترمکعب آب شیرین ۵/۵۹ kWh/m³ تعیین شد که افزایش ۱۰۲٪ نسبت به نمونه اول داشته است.

جدول ۵- درصد بازیافت، فاکتور تغلیظ و انرژی مصرفی (SEC) در سطوح مختلف شوری خوراک

شوری خوراک (mg/L)	درصد بازیافت	فاکتور تغلیظ	SEC (kWh/m ³)
۲۴۰۹	۴۱	۱/۷۰	۱/۹۸
۳۱۷۴	۳۹	۱/۶۳	۲/۲۹
۹۳۱۳	۱۹	۱/۲۴	۵/۹۵

تحلیل اقتصادی

در این پژوهش علاوه بر متغیرهای کمی و کیفی مربوط به تولید آب شیرین و تأمین انرژی موردنیاز، سامانه موردنظر از دیدگاه اقتصادی نیز بررسی شد. ارزیابی اقتصادی بخش مهمی از سامانه‌های مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر است، که دیدی کلی از هزینه‌های مرتبط با سامانه و زمان بازپرداخت آن را به برنامه ریزان و کاربران می‌دهد. هزینه مربوط به واحد PV-RO خورشیدی توسعه یافته در جدول ۶ نشان داده شده است و متغیرهای اصلی مورد استفاده در تحلیل اقتصادی و قیمت کل واحد سامانه حاضر، بیان شده است. طول عمر واحد، نرخ بهره و بازده سالانه واحد جدا از هزینه سرمایه، تأثیر زیادی بر هزینه آب تصفیه شده دارد (Sharon & Reddy, 2015).

از آنجا که حذف کامل املاح در آب آشامیدنی از سوی متخصصین توصیه نمی‌شود و تولید شورابه از سامانه‌های نمک‌زدایی از مشکلات اصلی این فرآیند با توجه به اثرات زیست‌محیطی نامطلوب آن است، در این پژوهش اختلاط بخشی از آب تغلیظ یافته با آب شیرین خروجی از سامانه به نحوی که کیفیت آب شیرین خروجی در حد استاندارد قابل قبول از نظر غلظت املاح باشد صورت گرفت. در منابع مختلف سطوح کیفیتی متفاوتی را برای حد آستانه کیفیت آب شرب از نظر مجموع نمک‌های حل شده در آن ارائه می‌دهند، در این پژوهش سطح کیفیت آب ۹۰۰ mg/L که طبق استاندارد سازمان بهداشت جهانی در حد قابل قبول قرار دارد در نظر گرفته شد. دبی آب شیرین تولید شده با اختلاط آب تغلیظ یافته با آب شیرین در جدول ۴ ارائه شده است؛ بنابراین، دبی آب شیرین در سطوح شوری منطقه یک و دو به ترتیب ۱۱ و ۸٪ افزایش یافت. از سوی دیگر در منطقه سوم مورد مطالعه با وجود اینکه کیفیت آب شیرین تولیدی قابل قبول بوده است با توجه به شوری بالای شورابه حاصل، امکان اضافه کردن آن به آب شیرین تولید شده و افزایش دبی حجمی وجود ندارد؛ لذا، با در نظر گرفتن میانگین مصرف سرانه آب شرب برای هر نفر برابر ۱۰ L/day، امکان تأمین آب شرب روزانه ۱۴۶ نفر در منطقه یک مورد مطالعه، ۱۲۲ نفر در منطقه دوم و ۵۰ نفر نیز در منطقه سوم با سامانه نمک‌زدایی PV-RO وجود دارد.

جدول ۴: دبی آب شیرین و آب تغلیظ یافته در سطوح مختلف شوری خوراک

با اختلاط آب تغلیظ یافته با آب شیرین

شوری خوراک (mg/L)	دبی (L/h)	
	آب شیرین	آب تغلیظ یافته
۲۴۰۹	۶۱	۷۳
۳۱۷۴	۵۱	۷۱
۹۳۱۳	۲۱	۸۷

نتایج ارزیابی سامانه نمک‌زدایی PV-RO در جدول ۵ ارائه شده است. حداکثر درصد بازیافت و فاکتور تغلیظ سامانه نمک‌زدایی PV-RO به ترتیب برابر ۴۱ و ۱/۷٪ در سطح شوری ۲۴۰۹ mg/L مشاهده شد. افزایش سطوح شوری آب در منطقه

جدول ۶- هزینه ساخت و بهره‌برداری سامانه نمک‌زدایی PV-RO در پژوهش حاضر

متغیر	مقدار (ریال)
هزینه اولیه احداث نیروگاه ۵۴ kW / خورشیدی (ریال)	۱۵۰,۰۰۰,۰۰۰
هزینه اولیه ساخت سامانه نمک‌زدایی RO (نیمه صنعتی)، (ریال)	۹۰,۰۰۰,۰۰۰
هزینه تعمیر و نگهداری نیروگاه خورشیدی (۱۰٪ هزینه اولیه)، (ریال)	۱۵,۰۰۰,۰۰۰
هزینه تعمیر و نگهداری سامانه نمک‌زدایی RO (۳۰٪ هزینه اولیه)، (ریال)	۲۷,۰۰۰,۰۰۰
نرخ سود بانکی (%)	۱۸
دوره بازگشت سرمایه اولیه (سال)	۱۰
مجموع هزینه‌های اولیه (ریال)	۲۴۰,۰۰۰,۰۰۰
مجموع هزینه‌های ثابت سالیانه (ریال)	۴۲,۰۰۰,۰۰۰

در یک تحقیق تجربی با هدف بیشینه تولید در یک واحد نمک‌زدایی با کمینه انرژی موردنیاز تأمین شده توسط ماژول‌های PV، دو روش رطوبت‌زنی و رطوبت‌زدایی^۲ (HDH) و RO را با هم ترکیب نمودند. نتایج آزمایش‌های تجربی نشان داد ترکیب HDH-RO می‌تواند انتخابی کارا برای تولید آب شیرین با کمینه انرژی موردنیاز باشد. بیشینه تولید آب شیرین در این تحقیق بین L/h تا ۱۹۲ تا ۲۰۰ گزارش شد. محدوده درصد بازیافت بین ۴۸ تا ۴۹/۸٪ و همچنین انرژی موردنیاز برای به‌ازای یک متر مکعب آب شیرین بین ۱/۲۲ تا ۱/۲۴ kWh است (Abdelgaied et al., 2021) این مقدار کمتر از مقادیر ارایه شده در تحقیق حاضر است. این اختلاف می‌تواند ناشی از تفاوت کیفیت آب خوراک و دبی آب شیرین تولیدی باشد. همچنین به‌منظور مقایسه نتایج پژوهش حاضر با موارد مشابه در محدوده سطح شوری آب‌های لب‌شور جدول ۸ تهیه شده است. طبق جدول ۸، درصد بازیافت گزارش شده نسبت به پژوهش حاضر کمتر است که می‌تواند ناشی از نوع فیلترهای کاربردی و کیفیت آب ورودی باشد.

جدول ۷- هزینه تمام شده باتوجه به سطح شوری خوراک و به‌ازای یک متر

مکعب آب شیرین

شوری آب خوراک (mg/L)	Annual Cost (Rials.)	Capital Cost (Rials.)	Total cost (Rials./m ³)
۲۴۰۹	۷۹,۱۰۰	۱۰۰,۵۸۰	۱۷۹,۶۸۰
۳۱۷۴	۹۳,۵۰۰	۱۱۸,۸۸۰	۲۱۲,۳۸۰
۹۳۱۳	۲۲۴,۶۰۰	۲۸۵,۵۶۰	۵۱۰,۳۱۰

جدول ۸- مقایسه متغیرهای اصلی بین برخی از سامانه‌های PV-RO و مطالعه حاضر

منبع	کشور	سطح شوری آب خوراک (mg/L)	درصد بازیافت	SEC (kWh/m ³)
تحقیق حاضر	ایران	۲۴۰۰	۴۱	۱/۹۸
(Alghoul et al., 2016)	مالزی	۲۰۰۰	۲۸	۱/۱
(Karimi et al., 2015)	آمریکا	۳۸۵۰	-	۱/۳
(Garg & Joshi, 2014)	هند	۱۵۰۰	۲۰	۱۷/۶
(Chafidz et al., 2014)	عربستان	۱۴۸۰	۱۶	-
(Qiblawey et al., 2009)	جordan	۱۷۰۰	۲۲	۱/۹
(Helal et al., 2008)	امارات متحده عربی	-	۲۶	۷/۳۳

1 Capital Cost Recovery Factor

2 Humidification dehumidification

3 Humidification dehumidification

نتیجه‌گیری

بخش عمده‌ای از مناطق کشور ایران دارای شرایط آب و هوایی خشک و نیمه‌خشک هستند و استان فارس نیز از این امر جدا نیست. با کاهش بارش و استفاده نامناسب از آب‌های شیرین سطحی و زیرسطحی، دسترسی به آب شیرین در شرایط خشک‌سالی به‌ویژه در مناطق دور از دسترس روستایی تبدیل به یک بحران جدی شده است. در این پژوهش یک سامانه PV-RO با هدف تأمین آب شرب یک روستای کم جمعیت با فرض ۳۰ خانوار (هر خانوار چهار نفر) در مرکز مطالعات خشک‌سالی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز طراحی و ساخته شد. نتایج تجربی این پژوهش نشان داد، با در نظر گرفتن میانگین مصرف سرانه آب شرب برای هر نفر برابر ۱۰ L/day، امکان تأمین آب

شرب روزانه ۱۴۶ نفر در منطقه یک مورد مطالعه، ۱۲۲ نفر در منطقه دوم و ۵۰ نفر نیز در منطقه سوم وجود دارد. بیشینه درصد بازیافت سامانه نمک‌زدایی PV-RO برابر ۴۱٪ در سطح شوری ۲۴۰۹ mg/L (مرکز تحقیقات کشاورزی زرگان) است که انرژی مصرفی برای تولید یک متر مکعب آب شیرین برابر ۱/۹۸ kWh/m³ و همچنین هزینه تولید آن نیز برابر ۱۷۹،۶۸۰ ریال محاسبه شد.

سپاس‌گزاری

این پژوهش با پشتیبانی و حمایت مالی شرکت آب و فاضلاب شیراز انجام شده است.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Abdelgaied, M., Kabeel, A. E., Kandeal, A. W., Abosheisha, H. F., Shalaby, S. M., Hamed, M. H., Yang, N., & Sharshir, S. W. (2021). Performance assessment of solar PV-driven hybrid HDH-RO desalination system integrated with energy recovery units and solar collectors: Theoretical approach. *Energy Conversion and Management*, 239, 114215. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114215>
- Abdelkareem, M. A., El Haj Assad, M., Sayed, E. T., & Soudan, B. (2018). Recent progress in the use of renewable energy sources to power water desalination plants. *Desalination*, 435, 97–113. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.11.018>
- Alghoul, M. A., Poovanaesvaran, P., Mohammed, M. H., Fadhil, A. M., Muftah, A. F., Alkilani, M. M., & Sopian, K. (2016). Design and experimental performance of brackish water reverse osmosis desalination unit powered by 2 kW photovoltaic system. *Renewable Energy*, 93, 101–114. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.015>
- Almutairi, K., Mostafaepour, A., Jahanshahi, E., Jooyandeh, E., Himri, Y., Jahangiri, M., Issakhov, A., Chowdhury, S., Hosseini Dehshiri, S. J., & Hosseini Dehshiri, S. S. (2021). Ranking locations for hydrogen production using hybrid wind-solar: A Case Study. *Sustainability*, 13(8), 4524.
- Assadi, M. R., Ataebi, M., sadat Ataebi, E., & Hasani, A. (2022). Prioritization of renewable energy resources based on sustainable management approach using simultaneous evaluation of criteria and alternatives: A case study on Iran's electricity industry. *Renewable Energy*, 181, 820–832.
- Bijani, M., & Hayati, D. (2015). Farmers' Perceptions toward Agricultural Water Conflict: The Case of Doroodzan Dam Irrigation Network, Iran TT -. *Mdrsjrns*, 17(3), 561–575. <http://jast.modares.ac.ir/article-23-10756-en.html>
- Burn, S., Hoang, M., Zarzo, D., Olewniak, F., Campos, E., Bolto, B., & Barron, O. (2015). Desalination techniques — A review of the opportunities for desalination in agriculture. *Desalination*, 364, 2–16. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.01.041>
- Chafidz, A., Al-Zahrani, S., Al-Otaibi, M. N., Hoong, C. F., Lai, T. F., & Prabhu, M. (2014). Portable and integrated solar-driven desalination system using membrane distillation for arid remote areas in Saudi Arabia. *Desalination*, 345, 36–49. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.04.017>
- Childs, W. D., Dabiri, A. E., Al-Hinai, H. A., & Abdullah, H. A. (1999). VARI-RO solar-powered desalting technology. *Desalination*, 125(1), 155–166. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(99\)00134-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0011-9164(99)00134-4)
- Garg, M. C., & Joshi, H. (2014). Optimization and economic analysis of small scale nanofiltration and reverse osmosis brackish water system powered by photovoltaics. *Desalination*, 353, 57–74. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.09.005>
- Helal, A. M., Al-Malek, S. A., & Al-Katheeri, E. S. (2008). Economic feasibility of alternative designs of a PV-RO desalination unit for remote areas in the United Arab Emirates. *Desalination*, 221(1), 1–16. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.09.005>



7.01.064

- Herold, D., & Neskakis, A. (2001). A small PV-driven reverse osmosis desalination plant on the island of Gran Canaria. *Desalination*, 137(1), 285–292. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)00230-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00230-2)
- Kalogirou, S. A. (2005). Seawater desalination using renewable energy sources. *Progress in Energy and Combustion Science*, 31(3), 242–281. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2005.03.001>
- Karimi, L., Abkar, L., Aghajani, M., & Ghassemi, A. (2015). Technical feasibility comparison of off-grid PV-EDR and PV-RO desalination systems via their energy consumption. *Separation and Purification Technology*, 151, 82–94. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.07.023>
- Khatib, T., Ibrahim, I. A., & Mohamed, A. (2016). A review on sizing methodologies of photovoltaic array and storage battery in a standalone photovoltaic system. *Energy Conversion and Management*, 120, 430–448. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.011>
- Lamei, A., van der Zaag, P., & von Münch, E. (2008). Impact of solar energy cost on water production cost of seawater desalination plants in Egypt. *Energy Policy*, 36(5), 1748–1756. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.12.026>
- Madani, K. (2014). Water management in Iran: what is causing the looming crisis? *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 4(4), 315–328.
- Qasim, M., Badrelzaman, M., Darwish, N. N., Darwish, N. A., & Hilal, N. (2019). Reverse osmosis desalination: A state-of-the-art review. *Desalination*, 459, 59–104. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.02.008>
- Qiblawey, H., Banat, F., & Al-Nasser, Q. (2009). Laboratory setup for water purification using household PV-driven reverse osmosis unit. *Desalination and Water Treatment*, 7(1–3), 53–59. <https://doi.org/10.5004/dwt.2009.695>
- Sharon, H., & Reddy, K. S. (2015). Performance investigation and enviro-economic analysis of active vertical solar distillation units. *Energy*, 84, 794–807. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.03.045>
- Shatat, M., & Riffat, S. B. (2014). Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 9(1), 1–19. <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts025>
- Shawky, H. A., Abdel Fatah, A. A., Abo ElFadl, M. M. S., & El-Aassar, A. H. M. (2015). Design of a small mobile PV-driven RO water desalination plant to be deployed at the northwest coast of Egypt. *Desalination and Water Treatment*, 55(13), 3755–3766. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1080447>
- Tzen, E., & Morris, R. (2003). Renewable energy sources for desalination. *Solar Energy*, 75(5), 375–379. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.07.010>
- Water, U. N. (2018). 2018 UN World Water Development Report, Nature-based Solutions for Water.