Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
Vol. 4, No. 2, PP. 37-46, Summer 2019
DOI: 10.22112/JWWSE.2019.163394.1128

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال چهارم، شماره ۲، صفحات ۳۷-۴۶، تابستان ۱۳۹۸

Research Paper

# Designing Solar Desalination System by Using Reverse Osmosis-Photovoltaic Method (Brackish Water of Sarband Village, Ardabil)

**Behnam Sami[1*], Mahdi Zarghami[2], Reza Yegani[3] and Mehran Sabahi[4]**

1- MSc. in Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Institute of Environment, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
2- Professor, Faculty of Civil Engineering and Institute of Environment, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
3- Professor, Faculty of Chemical Engineering, Sahand University of Technology, Sahand, Iran.
4- Associate Professor, Faculty of Electrical Engineering and Institute of Environment, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
* Corresponding author, Email: behnam.sami92@gmail.com

Received: 20/12/2018
Revised: 07/06/2019
Accepted: 08/06/2019

## Abstract

Water crisis is one of the most important challenges in the future of Iran. Most of the developing countries try to create a balance between their decreasing fresh water resources supply and increasing demand of the growing population. Water desalination technologies are one of the modern technologies in supplying fresh water and they can greatly reduce the water scarcity problems and improve the quality of life. However they generally require a great amount of energy. Using renewable energy sources to empower these technologies is an environmental friendly energy supply method. This research intended to design a solar desalination system that would be suitable for rural area in Ardabil Province, Iran, which can provide enough fresh water to meet the water demands. To this end, Reverse Osmosis - Photovoltaic method has been selected as the proposed method for water desalination. Two WAVE and PVsyst software have been used to model and analyze the Reverse Osmosis and Photovoltaic energy supplying system, respectively. The results showed that TDS measure before and after of desalination were 2117 and 177.86 mg/l, respectively, which lies within the accepted standard ranges. The results for photovoltaic system design showed that in order to produce enough energy for the desalination system, a photovoltaic system with a power of 9.5 kW is needed. It seems that by using of these systems solar desalination plants produce fresh water and decrease the by-products like brine and greenhouse gas. Moreover, it reduces the demand on the power distribution network.

**Keywords**: Desalination, Photovoltaic, Reverse osmosis, Solar desalination.

مقاله پژوهشی

# طراحی سیستم آب‌شیرین‌کن خورشیدی به‌روش اسمز معکوس - فتوولتائیک (مطالعه موردی: آب لب‌شور روستای سربند اردبیل)

**بهنام سامی[1*]، مهدی ضرغامی[2]، رضا یگانی[3] و مهران صباحی[4]**

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران- مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران و پژوهشکده محیط زیست، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
۲- استاد دانشکده مهندسی عمران و پژوهشکده محیط زیست ، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
۳- استاد دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند، سهند، ایران.
۴- دانشیار دانشکده مهندسی برق و پژوهشکده محیط زیست، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
* نویسنده مسئول، ایمیل: behnam.sami92@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۲۹
تاریخ اصلاح: ۱۳۹۸/۰۳/۱۷
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۱۷

## چکیده

بحران آب از چالش‌های بسیار مهم پیش‌روی جامعه ایران به‌شمار می‌رود. بیشتر کشورهای در حال توسعه سعی می‌کنند تا تعادلی بین منابع آب شیرین رو به کاهش و درخواست‌های تامین آب جمعیت‌های در حال افزایش برقرار کنند. به‌طور کلی فناوری‌های شیرین‌سازی آب، از روش‌های نوین تامین آب هستند، اما مصرف انرژی بالایی دارند. استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به‌عنوان یک راه‌حل بدیع برای تامین انرژی با ماهیت سازگار و پایدار و حفظ محیط‌زیست است. هدف از این مطالعه، طراحی یک سیستم بهینه آب‌شیرین‌کن خورشیدی است که برای روستای سربند اردبیل (مطالعه موردی) مناسب بوده و بتواند نیازهای آبی را از لحاظ کمی و کیفی تامین کرده و هم‌چنین از لحاظ زیست‌محیطی راه‌حل قابل‌قبولی باشد. بدین منظور روش اسمز معکوس- فتوولتائیک به‌عنوان روش انتخابی برای شیرین‌سازی آب انتخاب شده است. از دو نرم افزار WAVE و PVsyst نیز به‌ترتیب برای مدل‌سازی و تحلیل سیستم اسمز معکوس و سیستم تامین انرژی فتوولتائیک استفاده شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی و تحلیل نشان می‌دهد که مقدار TDS آب قبل و پس از تصفیه به‌ترتیب ۲۱۱۷ و ۱۷۷/۸۶ میلی‌گرم بر لیتر بوده که از لحاظ استانداردهای مربوطه قابل‌قبول است. هم‌چنین برای تامین انرژی سیستم تصفیه آب به سیستم فتوولتائیکی با توان ۹/۵ kW نیاز است. به‌نظر می‌رسد استفاده از این نوع سیستم‌ها، علاوه‌بر کاهش تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی، از فشار بر روی شبکه توزیع برق کاسته و هم‌چنین مشکل تامین آب آشامیدنی را حل نماید.

**کلمات کلیدی:** آب‌شیرین‌کن خورشیدی، شیرین‌سازی/ نمک زدائی، اسمز معکوس، فتوولتائیک.

## ۱- مقدمه

آب مهم ترین منبع طبیعی در جهان است به‌طوری که بدون آن حیات نمی‌تواند ادامه داشته باشد و اکثر صنایع نیز قادر به ادامه فعالیت نیستند. با وجود این‌که انسان می‌تواند بدون غذا چندین روز زندگی کند ولی عدم دسترسی به آب فقط طی چند روز نتایج هلاکت باری به دنبال دارد. از این‌رو وجود منابع مطمئن و ایمن آب، از شرایط ضروری تشکیل ایجاد یک جامعه پایدار است (دانشور ۱۳۸۳). ایران نیز از جمله کشورهایی است که در منطقه‌ای خشک و نیمه خشک واقع شده و علاوه‌بر کم بودن متوسط بارش سالانه، با پراکنش زمانی و مکانی ناهمگون و نامناسب آن نیز مواجه است. این مسائل به‌طور کلی پتانسیل کم‌آبی و احتمال خشک‌سالی را در ایران افزایش داده و حتی در شرایط عادی نیز در برخی نقاط کشور به‌ویژه نواحی جنوبی و جنوب شرقی در زمینه تأمین آب مورد نیاز مشکلات وسیعی را به‌وجود آورده است (افراسیابی و همکاران، ۱۳۸۷). تمامی منابع آبی آشامیدنی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، درنتیجه استخراج آب آشامیدنی از آب‌های شور می‌تواند به حل این معضل کمک شایانی نماید (Morad et al., 2017). لذا بیش از پیش ضرورت استفاده از این نوع فناوری‌ها در کشور ملموس است.

Aybar et al. (2010) با بررسی سیستم آب‌شیرین‌کن با منابع انرژی تجدیدپذیر مختلف به‌این نتیجه رسیدند که برای مناطق آسیای مرکزی (اطراف دریاچه آرال) برای جزایر با رژیم باد مطلوب، انرژی بادی مزیت بیشتری به سایرین دارد. از طرفی برای مناطق کم جمعیت و روستایی انرژی خورشیدی گزینه مناسبی است و دارای توجیه اقتصادی و فنی است. Bilton et al. (2011) با مطالعه موردی در مناطق مختلف جهان بر روی هزینه‌های شیرین‌سازی هر لیتر آب به‌روش BWRO و SWRO، به‌این نتیجه دست یافتند که هزینه‌های شیرین‌سازی هر لیتر آب در روش BWRO نسبت به روش SWRO کمتر است.

اسمزمعکوس- فتوولتائیک به عنوان یکی از امیدبخش‌ترین آب‌شیرین‌کن‌های تجدیدپذیر در نظر گرفته می‌شود، به‌ویژه هنگامی که در مناطق دور افتاده استفاده می‌شود (Al-Karaghouli and Kazmerski, 2013). از این‌رو، سیستم ترکیبی اسمز معکوس- فتوولتائیک کوچک مقیاس در سال‌های اخیر توجه زیادی را به‌خود جلب کرده است. دو نوع از این سیستم‌ها در بازار موجود هستند: سیستم اسمز معکوس-فتوولتائیک برای آب دریا و اسمز معکوس-فتوولتائیک برای آب لب‌شور. در این سیستم فشار کمتری برای نمک‌زدایی از آب های دریا مورد نیاز است و در نتیجه برق کمتری مصرف می‌کند.

Alsheghri et al. (2015) با طراحی اقتصادی سیستم آب شیرین‌کن خورشیدی به‌روش اسمز معکوس-فتوولتائیک و با تحلیل هزینه‌های طرح دریافتند که هزینه‌های تولید آب نسبت به روش‌های تصفیه متعارف، به‌میزان ۱۶٪ کاهش یافته است. هم‌چنین میزان تولید گازهای گلخانه‌ای سالانه به‌میزان ۱۰۳۵ تن $CO_2$ کاهش یافته است، لذا از این جهات پایدارتر و اقتصادی‌تر است. مطالعات فوق نشان می‌دهد که سیستم ترکیبی اسمز معکوس- فتوولتائیک برای آب‌های لب‌شور بهترین گزینه برای مناطق روستایی و دورافتاده است. زیرا علاوه‌بر تامین آب مورد نیاز مصارف مختلف، انرژی کمتری مصرف کرده، اقتصادی بوده و آلودگی زیست‌محیطی کمتری تولید می‌کند، لذا راه‌کار پایدارتری است.

اگر یک غشای نیمه تراوا بین دو محلول با غلظت‌های متفاوت مثل آب شور و شیرین قرار گیرد، مقداری از آب شیرین از غشا عبور کرده و به‌سمت آب شور تراوش می‌کند تا محلول را رقیق‌تر نماید. این پدیده را اسمز می‌گویند و به این فشار، فشار اسمزی می‌گویند. از آن‌جایی که غشا نسبت به نمک ناتراوا است، در صورتی‌که نیرو یا فشار بر قسمت محلول غلیظ وارد شود؛ جهت جریان آب، برعکس پدیده اسمز، از محلول غلیظ به‌سمت محلول رقیق خواهد بود که آن را اسمز معکوس[1] می‌نامند. چنین حرکتی عبور محلول غلیظ از فیلتر سبب کاهش غلظت آن شده و املاح آن‌را به‌حد قابل‌قبول برای مصارف آشامیدنی می‌رساند (صالحی و همکاران ۱۳۹۵). هدف از این پژوهش، طراحی یک سیستم آب‌شیرین‌کن خورشیدی است که از لحاظ فنی و اقتصادی قابل‌قبول بوده و در عین‌حال، ضوابط زیست‌محیطی را رعایت کند. بدین منظور سیستم ترکیبی اسمز معکوس- فتوولتائیک برای مطالعه انتخاب شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مطالعه موردی

روستای سربند، از روستاهای بخش ویلکیج شهرستان نمین و در استان اردبیل واقع است. این روستا در فاصله‌ی ۳ کیلومتری بزرگراه نمین - اردبیل قرار دارد و هم‌چنین فاصله آن با شهر نمین ۱۲/۸ کیلومتر و با شهر اردبیل ۱۸ کیلومتر است. موقعیت جغرافیایی آن، ۳۸ درجه و ۲۱ دقیقه و ۶۰ ثانیه شمالی و ۴۳ دقیقه و ۲۳ دقیقه و ۳۵ ثانیه شرقی بوده و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۷۰۳ متر است. جمعیت این روستا در حدود ۵۰ خانوار و ۲۰۰ نفر است.

#### ۲-۱-۱- مشکلات آبی محل مورد مطالعه

نیازهای آبی این روستا از دو طریق چاه نیمه عمیق موجود در حریم روستا و سد نهمت گولی در بالادست روستا تامین می‌شود. آب موردنیاز برای تامین مصارف شرب از منبع آب چاه

نیمه‌عمیق (منبع آب زیرزمینی) تامین می‌شود. عمق دسترسی به آب زیرزمینی در فصول مختلف سال متغیر بوده، اما عمق دسترسی بیشینه تقریبا در ۷ متری از دهانه چاه قرار دارد. آب چاه موجود در روستا بنابر آزمایش‌های صورت‌گرفته، میزان مواد معلق جامد کل آن بیش از ۴ برابر مقدار مجاز در استانداردهای جهانی است. آب این منبع به‌گونه‌ای است که امکان استفاده آن به‌شکل مرسوم موجود نیست و در خانه‌ها از سیستم‌های تصفیه آب خانگی استفاده می‌شود که باز پاسخ‌گوی مقوله تصفیه آب نیست. به گفته اهالی روستا، حتی احشام نیز از خوردن آب چاه خودداری می‌کنند.

تصفیه و شیرین‌سازی آب با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر برای تامین آب آشامیدنی از اهمیت والایی در مناطق دورافتاده برخوردار است. از میان انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی بادی و خورشیدی در مناطق دور افتاده شمال غرب کشور مطرح است که انرژی بادی به‌علت قابلیت تولید انرژی بالا در ماه‌های سرد سال در منطقه مورد مطالعه و درنهایت عدم‌تقارن آن با مصرف آب ماکزیمم که در فصول تابستانی رخ می‌دهد، به‌نظر می‌رسد روش بهینه‌ای برای تامین انرژی سیستم‌های آب‌شیرین‌کن نباشد. لذا انرژی خورشیدی در این مناطق می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد (رضایی بنفشه و همکاران، ۱۳۹۳). در نهایت روش اسمز معکوس- فتوولتائیک برای پژوهش پیش‌رو انتخاب شد.

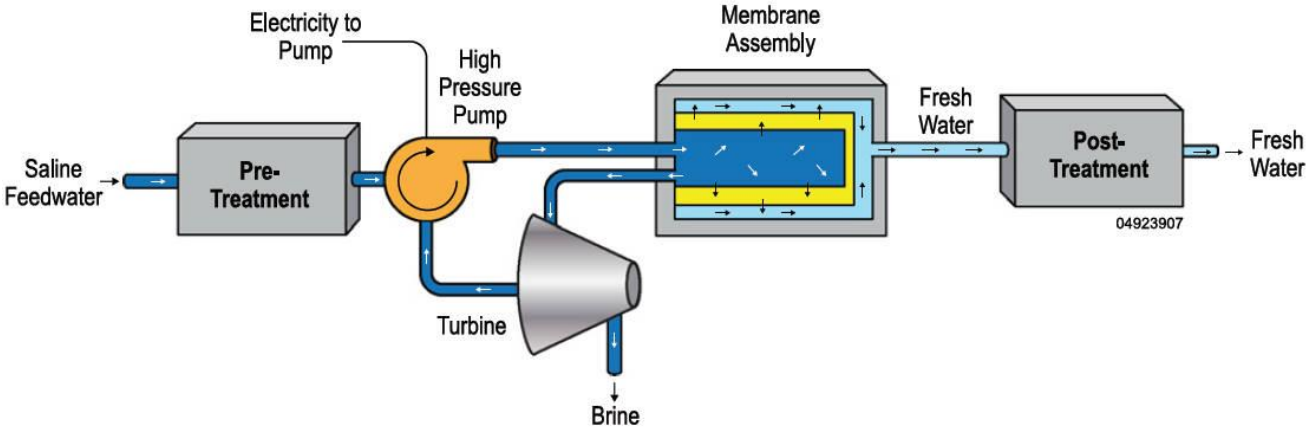
### ۲-۲- سیستم اسمز معکوس

یک سیستم اسمز معکوس، از بخش‌های اصلی پیش‌تصفیه، سیستم تصفیه غشایی اصلی و تصفیه نهایی تشکیل شده است. سیستم تصفیه اولیه برای جلوگیری یا کم‌کردن گرفتگی غشایی، پدیده رسوب و کاهش کارایی غشا و مواد طراحی می‌شود. سیستم تصفیه اصلی، همان سیستم اسمز معکوس (RO) است. فرآیند اسمز معکوس، امکان جداسازی یون‌های معلق و مواد معلق بزرگتر از جریان آب ورودی را فراهم می‌سازد. سیستم تصفیه نهایی، برای سیستم‌های تصفیه غشایی معمولا شامل تهویه شیمیایی یا ضد عفونی است.

سیستم اسمز معکوس در مقایسه با روش‌های دیگر اعم از MSF، MED، VC، ED و ... دارای مزایا و معایبی است که مهم‌ترین آن‌ها به شرح زیر است:

**مهم‌ترین مزایا:** ۱) امکان کارکرد پیوسته و مداوم در شبانه‌روز؛ ۲) قابلیت دریافت ورودی با TDS (کل مواد جامد محلول) بالا؛ ۳) میزان بازدهی بالا در کل سیستم؛ ۴) نرخ بالای بازیافت آب‌های آلوده تا ۹۸٪ منابع ورودی بسته به نوع و میزان آلاینده‌ها و ۵) مصرف انرژی پایین.

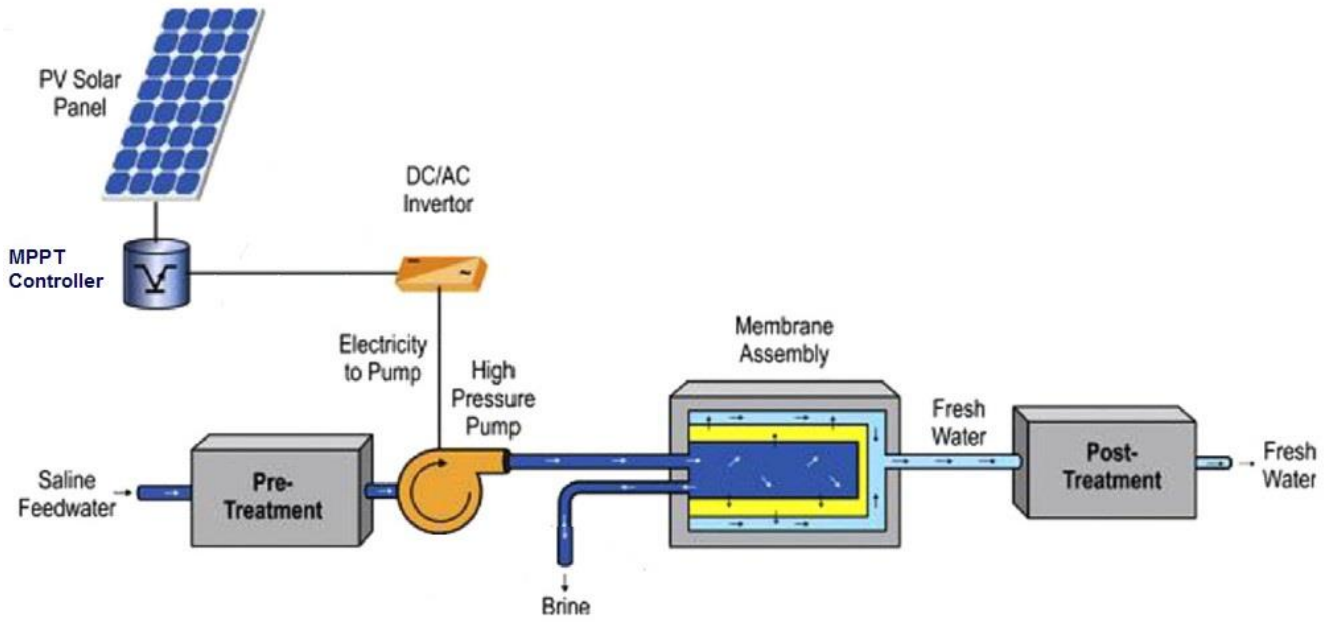
**مهمترین معایب:** ۱) قیمت نسبتا بالای غشاها؛ ۲) احتمال وقوع پدیده گرفتگی غشایی؛ ۳) احتمال تشکیل رسوب در غشا و ۴) تولید پساب نمکی.




**شکل ۱- سیستم اسمز معکوس (Al-Karaghouli And Kazmerski, 2013)**

### ۲-۳- سیستم‌های فتوولتائیک[۲]

سیستمی که در آن انرژی خورشیدی، بدون بهره‌گیری از مکانیزم‌های متحرک و شیمیایی، به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود، اثر آن را فتوولتائیک می‌نامند. عاملی که در این فرآیند به‌کار می‌رود، سلول خورشیدی نامیده می‌شود. اگرچه انرژی الکتریکی حاصل هنوز به میزان کافی اقتصادی نیست ولی نباید فراموش کرد که در مناطق دورافتاده و مکان‌هایی که دسترسی به الکتریسیته مقدور نیست، از سیستم‌های فتوولتائیک استفاده می‌شود (حاج سقطی، ۱۳۹۳).




**شکل ۲- نمای کلی از سیستم اسمز معکوس- فتوولتائیک اتصال مستقیم ( Al-Karaghouli And Kazmerski, 2013)**

به‌منظور طراحی سیستم اسمز معکوس- فتوولتائیک، از نرم‌افزار WAVE[۳] برای طراحی سیستم اسمز معکوس و از نرم‌افزار PVsyst برای طراحی سیستم فتوولتائیک استفاده شده است.

## ۲-۴- مدل‌سازی سیستم اسمز معکوس

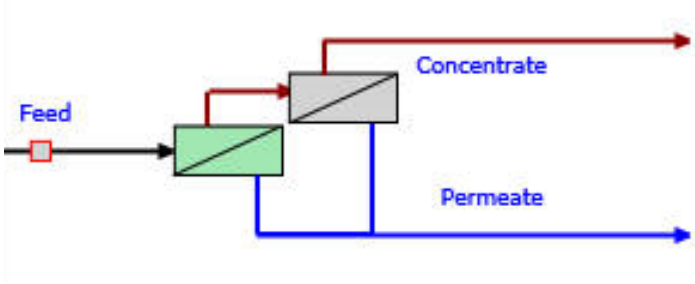
نرم‌افزار WAVE قابلیت مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم اسمزمعکوس را به‌صورت کامل دارا است. برای مدل‌سازی از سیستم اولترافیلتراسیون برای بخش پیش‌تصفیه و از سیستم اسمز معکوس برای بخش تصفیه اصلی استفاده شده و به‌علت غلظت نسبتا پایین آلاینده ها از بخش تصفیه نهایی صرف‌نظر شده است. جزئیات مدل‌سازی در سیستم‌های اولترافیلتراسیون و اسمز معکوس در جدول‌های ۱ تا ۳ و شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است.

**جدول ۱- جزئیات مدل‌سازی سیستم اولترافیلتراسیون در نرم افزار WAVE**

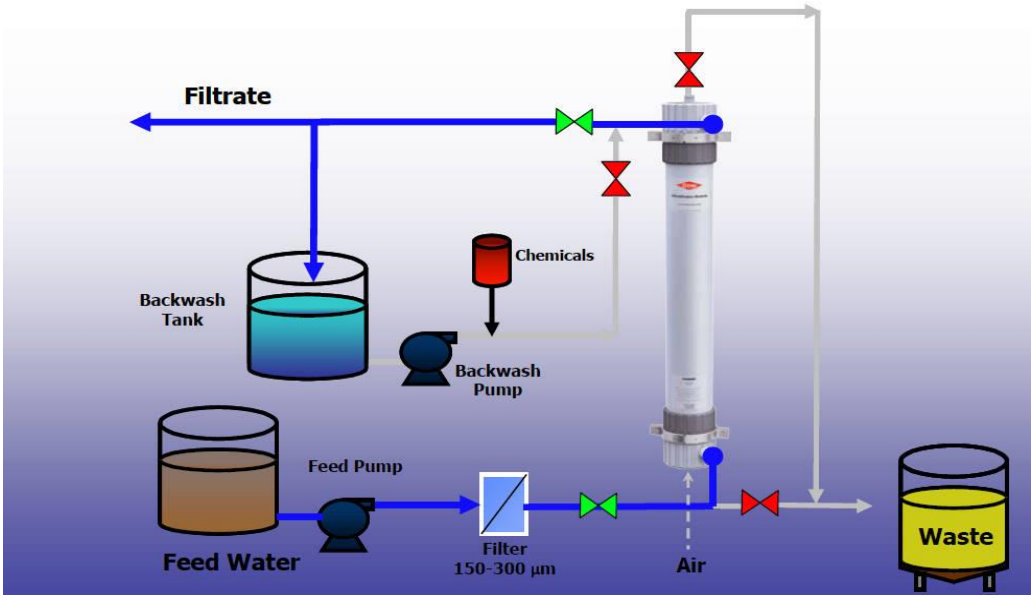
| غشا اولترافیلتراسیون | IntegerFlux 2860XP (Filmtech) |
|---|---|
| پیکربندی غشاهای اولترافیلتراسیون | ۱×۲ |
| راندمان سیستم اولترافیلتراسیون (٪) | ۹۵ |
| شار فیلتراسیون (LMH) ($c^o$ 10) | ۷۴/۵ |
| شار شستشوی معکوس (LMH) | ۱۰۰ |
| شار CEB (LMH) | ۶۰ |
| دبی جریان پیشران ($m^3/d$) | ۹۱/۸ |
| دبی جریان هوادهی ($Nm^3/h$) | ۱۲ |
| دبی جریان بازیافت CIP ($m^3/d$) | ۳۶ |

**جدول ۲- جزئیات مدل‌سازی سیستم اسمز معکوس در نرم افزار WAVE**

| غشا اسمز معکوس | XLE-4040 (Filmtech) |
|---|---|
| پیکربندی غشاهای اسمز معکوس (مرحله اول) | ۱×۶ |
| پیکربندی غشاهای اسمز معکوس (مرحله دوم) | ۱×۴ |
| راندمان سیستم اسمز معکوس (٪) | ۷۳ |
| شار سیستم اسمز معکوس (LMH) | ۲۵/۸ |
| دبی ورودی سیستم ($m^3/d$) | ۶۸/۵ |




شکل ۳- نمای شماتیک کلی از سیستم تصفیه اصلی (اسمز معکوس)




شکل ۴- نمای شماتیک کلی از سیستم تصفیه اولترافیلتراسیون

جدول ۳- پارامترهای طراحی و مقادیر انتخاب شده برای آن‌ها در سیستم WAVE

| پارامترهای کیفی آب | | | |
|---|---|---|---|
| پارامتر | پارامتر | مقدار انتخاب شده | ملاحظات |
| دما | دما | ۱۵ | محدوده کلی بین ۱۰-۳۰ است |
| کدورت | کدورت | $\geq$ ۲ | |
| TSS | TSS | $\geq$ ۵ | |
| SDI | SDI | ۲ | |

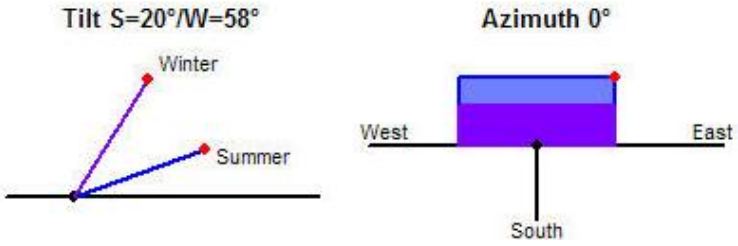
## ۲-۵- مدل‌سازی سیستم فتوولتائیک

این نرم‌افزار دارای بخش جداگانه‌ای است که قابلیت طراحی سیستم‌های فتوولتائیک را برای اهداف پمپاژ خورشیدی دارند. لذا از این بخش نرم‌افزار برای تحلیل و بهینه‌سازی سیستم تامین انرژی فتوولتائیک استفاده می‌شود. نحوه ورود داده‌ها به نرم‌افزار بدین صورت است که ابتدا از روی نقشه کره زمین، نقطه موردنظر برای طراحی انتخاب می‌شود. سپس نرم‌افزار به‌صورت هوشمند، مختصات جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا، مسیرهای حرکت خورشید برای نقطه موردنظر را ارائه می‌دهد. این مسیرها برای منطقه مورد مطالعه مطابق شکل ۶ ارائه شده است. با این فرض که به‌علت وجود موانع طبیعی نظیر کوه و ... از زاویه‌های کمتر از ۵ درجه نسبت به قائم، تابشی دریافت نمی‌شود. هم‌چنین آرایه‌ها بدون حرکت افقی و قائم و به‌صورت ثابت درنظر گرفته شده‌اند.

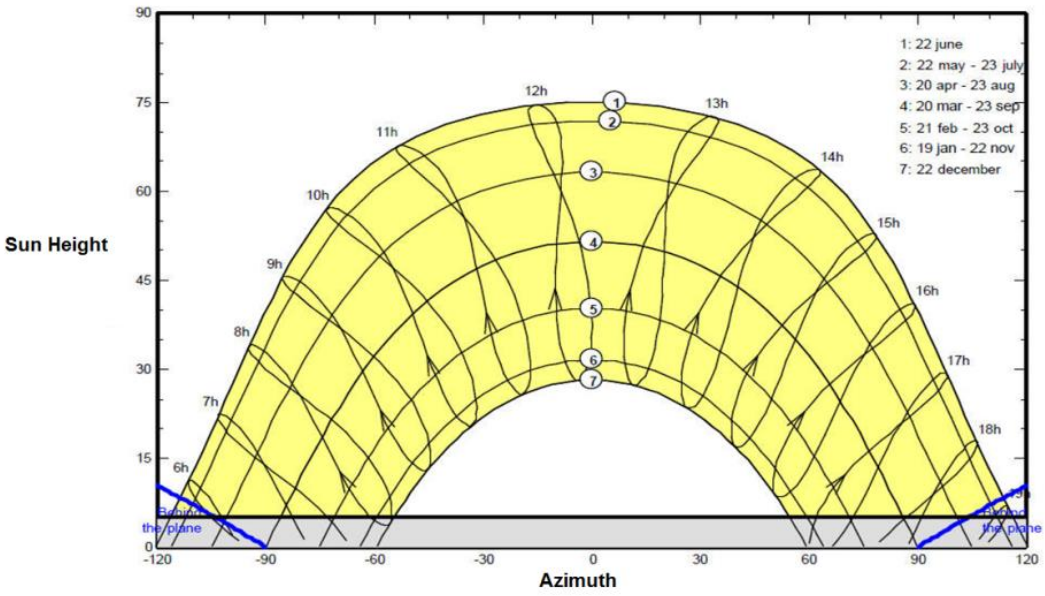
حال با انتخاب مراکز پردازش داده‌های هواشناسی اعم از NASA، Meteonorm و یا مراکز دیگر اطلاعات مربوطه، می‌توان مقادیر مربوط به شدت تابش خورشیدی، ضریب پخش خورشیدی، دمای هوا و سرعت باد را به‌صورت ماهانه وارد کرد. بدین منظور از داده‌های مرکز پردازش داده‌های هواشناسی کمیسیون اروپا به‌علت به‌روز بودن آن‌ها (وجود داده‌های مربوط به سال ۲۰۱۶) برای منطقه موردنظر استفاده شد.

با توجه به جهت‌های حرکت خورشید در نقطه موردنظر، به‌نظر می‌رسد که جهت رو به جنوب، بهترین جهت برای جهت‌گیری افقی و با توجه به تعیین دو زاویه قائم به‌علت افزایش انرژی دریافتی و در نتیجه افزایش راندمان سیستم در فصول مختلف سال (زاویه تابستانی و زمستانی)، زاویه ۲۰ درجه و ۵۸ درجه نسبت به افق به‌ترتیب برای دو حالت تابستانی و زمستانی

مناسب باشد (مطابق شکل ۵). سپس نوع آرایه فتوولتائیک و سیستم اینورتر مناسب باید انتخاب شود. با توجه به خروجی‌های تحلیل سیستم اسمز معکوس در WAVE، نرم‌افزار PVsyst اقدام به پیشنهاد سیستم پمپاژهای مختلف برای تامین دبی و فشار آب سیستم تصفیه می‌کند. با انتخاب سیستم پمپاژ مناسب، نرم‌افزار سیستم فتوولتائیک مناسب را محاسبه کرده و جزئیات انرژی دریافتی و آب پمپاژشده را ارائه می‌دهد.




**شکل ۵- مسیر جهت‌گیری آرایه‌ها در محل مورد مطالعه**




**شکل ۶- مسیر حرکت خورشید در محل مورد مطالعه**

## ۳- نتایج و بحث

با توجه به نتایج تحلیل نرم‌افزار WAVE، مقادیر پارامترهای کیفی آب پس از تصفیه در جدول ۴ ارائه شده است. برطبق این نتایج، کیفیت آب تولیدی براساس تمامی استانداردهای رایج آب آشامیدنی از قبیل موسسه استاندارد ایران، سازمان بهداشت جهانی، استاندارد آمریکا، استاندارد کمیسیون اروپا و ... در حد مطلوب است.

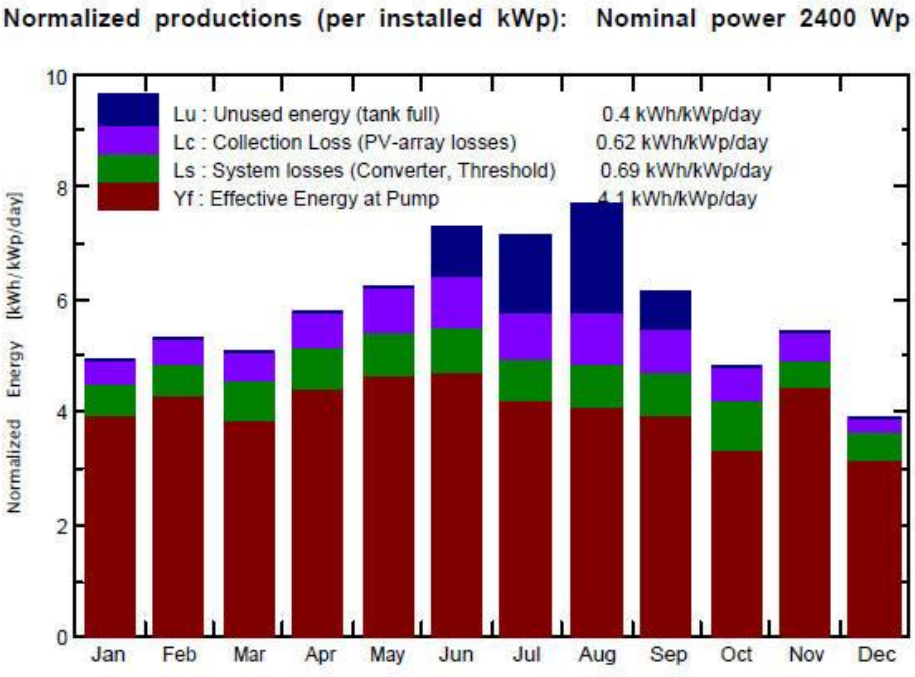
**جدول ۴- وضعیت پارامترهای کیفی آب قبل و پس از تصفیه**

| پارامترهای کیفی آب | | | |
|---|---|---|---|
| پارامتر | واحد | غلظت قبل از تصفیه | غلظت پس از تصفیه |
| pH | | ۷/۹۵ | ۷/۰۰ |
| TDS | mg/l | ۲۱۱۷ | ۱۷۷/۸۶ |
| $CO_2$ | mg/l | ۵/۶۶ | ۱۵/۶۸ |
| K | mg/l | ۲۴/۶۳ | ۱/۰۴ |
| Na | mg/l | ۳۳۰/۳۶ | ۴۷/۸۲ |
| Mg | mg/l | ۱۰۵/۹۷ | ۱/۶۰ |
| Ca | mg/l | ۱۵۶/۹۱ | ۲/۳۲ |
| $CO_3$ | mg/l | ۵/۳ | ۰/۰۵ |
| $HCO_3$ | mg/l | ۴۴۷/۴ | ۹۲/۶۸ |
| Cl | mg/l | ۳۰۴/۸۹ | ۲۱/۶۵ |
| $SO_4$ | mg/l | ۷۴۱/۶۱ | ۱۰/۷۰ |

با توجه به خروجی‌های حاصل از تحلیل سیستم تصفیه اسمز معکوس، برای پمپاژ جریان سیال در سیستم‌های اولترافیلتراسیون و اسمز معکوس به‌ترتیب به یک پمپ ۲/۲ kW و یک پمپ ۷/۳ kW از نوع سانتریفیوژ چند مرحله‌ای سه فاز و در مجموع به توان الکتریکی ۹/۵ kW نیاز است. بدین منظور از سیستم فتوولتائیک با توان معادل ۹/۵ kW به‌منظور تامین انرژی سیستم اسمز معکوس استفاده می‌شود که دارای سیستم MPPT به‌منظور به حداکثر رساندن توان خروجی سیستم فتوولتائیک و مبدل جریان به‌منظور تبدیل جریان DC به AC و هم‌چنین افزایش ولتاژ خروجی برای ایجاد جریان سه فاز است. با توجه به تحلیل نرم‌افزار PVsyst، نتایج حاصل از مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم در این نرم‌افزار در جدول ۵ و شکل‌های ۷ تا ۱۰ ارائه شده است. در جدول ۵ اطلاعات مربوطه اعم از نوع، تعداد پانل‌ها و مبدل‌ها، مقادیر توان، ولتاژ و ... بیان شده است.

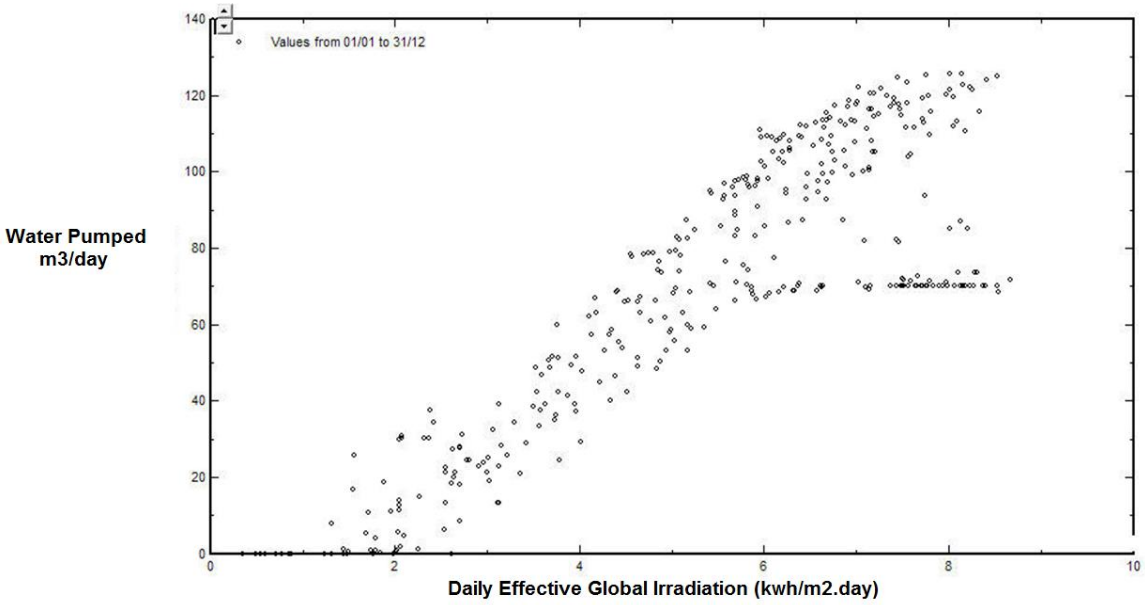
**جدول۵- نتایج آنالیز سیستم فتوولتائیک**

| پارامتر | نوع/مقدار |
|---|---|
| مدل پانل | Yingli-YL300P-35b |
| نوع پانل | Si-poly |
| تعداد پانل | ۳۲ |
| توان ماکزیمم کل (kW) | ۹/۵ |
| ولتاژ در توان ماکزیمم (V) | ۲۵۹ |
| شدت جریان در توان ماکزیمم (Ah) | ۲۵ |
| مساحت هر ماژول ($m^2$) | ۱/۹۴ |
| مساحت کل ماژول ها ($m^2$) | ۶۲/۰۸ |
| راندمان ماژول (%) | ۱۵/۴۶ |
| راندمان سیستم فتوولتائیک (%) | ۸۸/۹ |
| مبدل جریان | ABB-ACS355 7.5kW و 2.2kW |
| نوع مبدل | AC-DC ۳ فاز |
| تعداد مبدل | ۲ |




**شکل ۷- اطلاعات پمپاژ روزانه به‌صورت متوسط ماهانه برای پمپ سیستم اولترافیلتراسیون**

شکل ۷، متوسط ماهانه انرژی دریافتی سیستم فتوولتائیک، میزان هدررفت سیستمی، هدررفت ناشی از پر بودن مخزن ذخیره و مقدار انرژی موثر در عملیات پمپاژ را برای پمپ اولترافیلتراسیون نشان می‌دهد. مقادیر این شکل نشانگر تطابق عرضه و تقاضا در سیستم تامین انرژی در اکثر ماه های سال و افزایش تولید و هدررفت ناشی از پر بودن مخزن آب در ماه‌های گرم سال است.

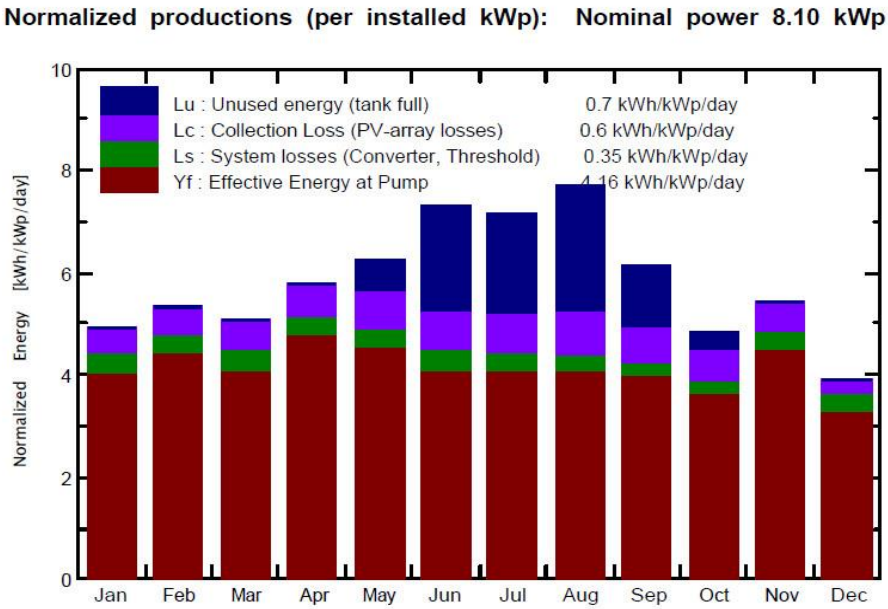



**شکل ۸- میزان آب تولیدی در روزهای مختلف سال برای پمپ سیستم اولترافیلتراسیون**

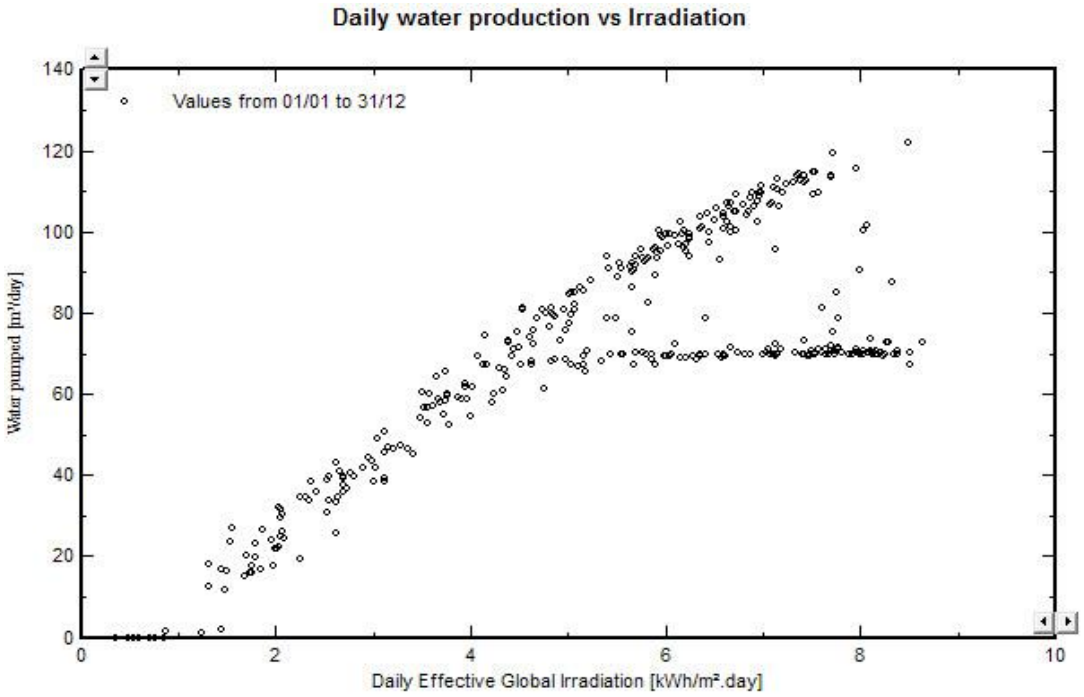
شکل ۸، میزان دبی تمامی روزهای یک‌سال را در شدت تابش‌های مختلف نشان می‌دهد. به‌ازای تابش خورشیدی متفاوت، دبی پمپاژ شده نیز متفاوت خواهد بود. از طرفی برای تامین کمبود آب ناشی از کاهش انرژی دریافتی در فصول سرد سال، مقدار دبی در فصول گرم سال به دو برابر میزان متوسط رسیده است. شرح شکل ۹ همانند شکل ۷ و شرح شکل ۱۰ همانند شکل ۸ است.

### ۳-۱- مدیریت پساب خروجی سیستم

یک محصول جانبی رایج در انواع تاسیسات آب‌شیرین‌کن، پساب نمکی است. مقدار نمک به‌عنوان درصدی از آب ورودی بسته به‌نوع روش، غلظت اولیه آب خوراک و عوامل موثر بر انتخاب روش دفع، متفاوت است. پساب نمکی که هم‌چنین به‌عنوان کنسانتره، آب برگشتی یا فاضلاب شناخته می‌شود، نمی‌تواند به‌لحاظ زیست‌محیطی در منابع آبی تخلیه شود، در حالی‌که که در اکثر تاسیسات آب‌شیرین‌کن اسمز معکوس واقع در سواحل انجام می‌شود. در چنین مواردی، حوضچه تبخیر ۴ ممکن است گزینه مناسبی باشد. روش‌های دیگر مدیریت این‌گونه پساب‌ها عبارتند از کمینه‌سازی زباله، تخلیه به آب سطحی، تخلیه به تاسیسات تصفیه فاضلاب، تزریق به چاه عمیق، تبخیر فاضلاب که ممکن است راه‌کارهای مناسبی باشند (Baawain et al., 2015). روش استفاده مجدد از نمک از سایر روش‌های مدیریت جریان پساب خروجی است. در این روش نمک‌های حاصل از عملیات تبخیر را می‌توان در صنایع مختلف شیمی و یا صنایع دیگر از قبیل راهسازی، صنایع سیمان استفاده کرد (Peck, 2015).




**شکل ۹- اطلاعات پمپاژ روزانه به‌صورت متوسط ماهانه برای پمپ سیستم اسمز معکوس**




**شکل ۱۰- میزان آب تولیدی در روزهای مختلف سال برای پمپ سیستم اسمز معکوس**

به‌نظر می‌رسد سیستم آب‌شیرین‌کن خورشیدی به‌روش اسمز معکوس- فتوولتائیک، برای منطقه مورد مطالعه گزینه مناسبی است. زیرا علاوه‌بر تعیین تامین سوخت بدون نیاز به سوخت‌های فسیلی، اثرات زیست‌محیطی چندانی درصورت مدیریت پساب خروجی نخواهند داشت. از طرفی با تامین انرژی از منابع تجدیدپذیر، طبق محاسبات نرم‌افزار PVsyst مانع از تولید ۱۷/۶۵ تن $CO_2$ در طول ۲۰ سال عمر بهره‌برداری خواهد شد. هم‌چنین ماهیت مستقل این سیستم به‌گونه‌ای است که باعث کاهش فشار بر روی شبکه‌های توزیع برق و حل مسئله تامین آب آشامیدنی سالم می‌شود.

## ۴- نتیجه‌گیری

هدف از انجام این مطالعه، حل مشکل کیفیت آب منطقه مورد مطالعه براساس طراحی یک سیستم آب‌شیرین‌کن خورشیدی است که برای منطقه مذکور گزینه‌ی مناسبی باشد و هم‌چنین براساس ضوابط زیست‌محیطی قابل‌قبول باشد. سیستم پیشنهادی به‌صورت اسمز معکوس- فتوولتائیک، سیستمی با اتصال مستقیم است. بدین معنی که در این سیستم، با دریافت انرژی ناشی از تابش خورشیدی توسط سیستم فتوولتائیک، سیستم اسمزمعکوس نیز شروع به‌کار می‌کند. دلیل انتخاب این نوع از اتصال این است که با افزایش شدت تابش خورشیدی در اواسط روز، دبی آب تولیدی نیز بیشتر خواهد بود و چون پیک مصرف روزانه در ساعات میانی روز اتفاق می‌افتد. تقریبا این افزایش برداشت آب از شبکه توزیع و افزایش تولید آب در بخش تصفیه برهم منطبق شده و به‌نظر می‌رسد کمبودی در این زمینه وجود نخواهد داشت. هم‌چنین با توجه به این بدیهی است در ماه‌های گرم سال، برداشت آب بیش از میانگین مصرف سرانه باشد، تولید آب نیز به‌علت افزایش شدت و تعداد ساعات تابش خورشیدی بیشتر می‌شود و این هم‌پوشانی و تطابق میزان مصرف و تولید، نکته مثبت سیستم‌های اتصال مستقیم است. نکته دیگری که در این پژوهش درنظر گرفته شده است، ذخیره آب مازاد از برداشت (معمولا در روزهایی که شدت تابش زیاد است) در مخزن آب ۱۵۰۰ مترمکعبی موجود در محل مورد مطالعه، به‌منظور استفاده در روزهایی که تابش خورشیدی و به‌تبع آن میزان تولید آب تصفیه شده کم است.

## ۵- پی نوشت ها

1- Reverse Osmosis (RO)
2- Photovoltaic Systems (PV)
3- Water Application Value Engine (WAVE)
4- Evaporation Ponds

## ۶- مراجع


افراسیابی، ن.، احتشامی م.، و اردکانیان ر.، (۱۳۸۷)، "طراحی بهینه سیستم تصفیه آب با نرم افزار ROSA"، *دومین همایش و نمایشگاه تخصصی مهندسی محیط زیست*، دانشگاه تهران.

حاج سقطی، ا.، (۱۳۹۳)، اصول وکاربرد انرژی خورشیدی، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.

دانشور، ن.، (۱۳۸۳)، *اصول کنترل کیفیت آب*، انتشارات دانشگاه تبریز.

رضایی بنفشه، م.، جهانبخش، س.، دین پژوه، ی.، و اسمعیل‌پور، م.، (۱۳۹۳)، "امکان‌سنجی استفاده از انرژی باد در استان‌های اردبیل و زنجان"، *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۴۶(۴)، ۲۶۱-۲۷۴.

صالحی، س.، خانجانی، م.، و بارانی، غ.، (۱۳۹۵)، "ارزیابی اقتصادی تکنولوژی‌های مختلف آب شیرین‌کن"، *کنفرانس بین‌المللی توسعه پایدار، راه‌کارها و چالش‌ها با محوریت کشاورزی، منابع طبیعی، محیط‌زیست و گردشگری*، دانشگاه تبریز.

Al-Karaghouli, A., and Kazmerski, L.L., (2013), "Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes", *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 343-356.

Alsheghri, A., Sharief, S.A., Rabbani, and Sh, Aitzhan, N.Z., (2015), "Design and cost analysis of a solar photovoltaic powered reverse osmosis plant for Masdar institute", *Energy Procedia*, 75, 319-324.

Aybara, H.S., Akhatovb, J.S., Avezovab, N.R., and Halimovb, A.S., (2010), "Solar powered RO desalination: Investigations on pilot project of PV powered RO desalination system", *Applied Solar Energy*, 46(4), 275-284.

Baawain, M., Choudri, B.S., Ahmed M., and Purnama, A., (2015), *Recent progress in desalination, environmental and marine outfall systems*, Springer.

Bilton, A.M., Wiesman R., Arif, A.F.M., Zubair S.M., and Dubowsky S., (2011), "On the feasibility of community-scale photovoltaic-powered reverse osmosis desalination systems for remote locations", *Renewable Energy*, 36(12), 3246-56.

Morad, M.M., El-Maghawry, Hend, A.M., and Wasfy, K.I., (2017), "A developed solar-powered desalination system for enhancing fresh water productivity", *Solar Energy*, 146, 20-29.

Peck, S., (2015), "Reverse osmosis concentrate management", Technical Article, www.axeonwater.com.