مستخرج از پایان نامه

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و شش، شماره چهار، تیر ماه ۱۴۰۳(۷۵-۶۱)

طراحی آب شیرین کن با استفاده از انرژی زمین گرمایی چاه‌های نفت رها شده

نازیلا عزیزی بروجردی[۱]

اشکان عبدالی سوسن[۲*]

a.abdali@srbiau.ac.ir

عزت اله کاظم زاده[۳]

تاریخ دریافت: ۹۹/۱۱/۴ **تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۴/۱۹**

چکیده

زمینه و هدف: شیرین کردن آب شور می‌تواند در مقابله با بحران کم آبی کمک مناسبی باشد. با توجه به این که چاه‌های نفت جهت استحصال نفت سرمایه گذاری و حفاری شده‌اند و پس از اتمام استحصال نفت و گاز می‌توان از انرژی حرارتی این چاه‌ها برای تولید آب شیرین استفاده کرد. هدف تحقیق حاضر طراحی آب شیرین کن زمین گرمایی با استفاده از انرژی حرارتی اعماق چاه نفت رها شده است.

روش بررسی: این تحقیق در سال ۱۴۰۰ در جزیره خارک در خلیج فارس انجام شده است. ابتدا از روش شیرین سازی چند مرحله‌ای برای استفاده از حرارت چاه نفت رها شده انتخاب می‌شود. سپس روش ها و ساختارهایی که بتوان به کمک آن‌ها میزان تولید آب شیرین با استفاده از این چاه را افزایش داد، با استفاده از نرم افزار EES مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور ۴ سناریو مختلف ارائه گردیده است، که شامل:

- شیرین سازی چند مرحله ای مرسوم
- شیرین سازی چند مرحله ای به همراه پیش گرمایش ثانویه
- شیرین سازی چند مرحله ای به همراه پیش گرمایش ثانویه و فلش باکس خارجی
- شیرین سازی چند مرحله ای به همراه پیش گرمایش ثانویه، فلش باکس خارجی و فلش باکس داخلی

یافته ها و نتیجه گیری: نتایج این تحقیق نشان داد که در سناریو چهارم بیشترین مقدار تولید آب شیرین مشخص شده است که این مقدار برابر با ۵۹۲ متر مکعب در روز است. سپس تاثیرات محیط زیستی استفاده از این نوع آب شیرین آنالیز شده است. در بخش پایانی این پژوهش آب شیرین کن زمین گرمایی با استفاده از حرارت چاه نفت رها شده به روش ارزش فعلی و نرخ های تورم تحلیل اقتصادی شده است.

واژه‌های کلیدی: بحران آب، آب شیرین کن، سوخت‌های فسیلی، انرژی های تجدید پذیر، چاه نفت رها شده.

۱- دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی سیستم‌های انرژی، گروه مهندسی انرژی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲- استادیار، گروه فنی و مهندسی، واحد آستارا، دانشگاه آزاد اسلامی، آستارا، ایران.*(مسوول مکاتبات)

۳- دانشیار، پردیس پژوهش و توسعه صنایع بالادستی، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران.

J. Env. Sci. Tech., Vol 26, No. 4, July, 2024

Geothermal seawater desalination using abandoned oil wells

Nazila Azizi Borujerdi [1]

Ashkan Abdalisousan[2*]

a.abdali@srbiau.ac.ir

Ezatallah Kazemzadeh[3]

Admission Date: July 10, 2021 Date Received: January 23, 2021

Abstract

Background and Objective: Desalination of brackish water can be a good help in dealing with the water crisis. The aim of the present study is to design a geothermal desalination plant using thermal energy from the depths of abandoned oil wells.

Material and Methodology: This research was done in 1400 on Khark Island in the Persian Gulf. First, a multi-stage sweetening method is selected to use the heat of the abandoned oil well. Then, the methods and structures that help you increase the production of sweet milk using this option were examined using EES software, for which 4 different types have been presented, including:

- Conventional multi-stage sweetening
- Multi-stage sweetening with secondary preheating
- Multi-stage sweetening with secondary preheating and external flash box
- Multi-stage sweetening with secondary preheating, external flashbox and internal flashbox

Findings: Research findings show that the variable of presence of tourists in this area is influenced by the following life indices including: Economic prosperity, improving environmental quality, reduction of air pollution, improving communication of inhabitants and easy access to public transportation means and improving cultural issues.

Discussion and Conclusion: In the final part of this research, geothermal desalination using economic heat from abandoned oil wells using current value method and inflation rates is economically analyzed.

Key words: Water Crisis, Desalination, Fossil fuels, Renewable energy, Abandoned oil wells.

1- PhD student in Energy systems engineering, Department of Energy and Economics, science and research Branch, Islamic Azad university, Tehran, Iran.

2- Assistant professor, technical and engineering group, Astara unit, Islamic Azad university, Astara, Iran *(*Corresponding Author*)

3- Associate Professor, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Tehran, Iran.

مقدمه

نگرانی جهانی در مورد کم شدن منابع آب روز به روز در حال افزایش است. با توجه به میزان منابع آب و سرانه مصرف، ایران از جمله کشورهایی است که در گروه کشورهای مواجه با کمبود فیزیکی آب قرار دارد(۱). به طور کلی روش‌های شیرین سازی آب به دو دسته اصلی روش‌های حرارتی و غشایی تقسیم می شوند. روش‌های حرارتی که در آن با استفاده از تبخیر آب و سپس چگالیده شدن، این آب شور را تبدیل به آب شیرین می‌کند(۲). این روش به دلیل تبخیر و چگالش آب، مناسب آب‌های با شوری بالا مانند آب دریا و اقیانوس‌ها است(۳). از میان انرژی‌های تجدید پذیر از انرژی زمین گرمایی به آسانی می‌توان برای شیرین سازی آب دریا استفاده کرد(۴). اما استفاده از انرژی زمین گرمایی به دلیل نیاز به حفاری‌های پر هزینه هنوز از نظر اقتصادی به صرفه نشده است اما عدم تولید آلودگی محیط زیستی از مهم ترین مزایای این انرژی به شمار می‌رود(۵).

غفور و همکاران مروری جامع از تکنولوژی‌های شیرین سازی با استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر ارائه دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که در حال حاضر محدودیت‌های اقتصادی و تکنولوژیکی مقیاس استفاده نیروگاه‌های آب شیرین کن با استفاده از انرژی تجدید پذیر را محدود می‌کند. همچنین، انرژی زمین گرمایی و خورشیدی آینده مثبتی برای شیرین سازی آب دارند(۶). حنفا و همکاران یک فرآیند آب شیرین کن با تولید همزمان برق را برای ارائه دادن یک مدل حرارتی- اقتصادی مورد بررسی قرار داد. آنها نقطه بهینه طراحی را برای تولید بیشینه آب پیدا کردند(۷). کرایست و همکاران مدلی تکنیکی اقتصادی برای آب شیرین کن زمین گرمایی با استفاده از سفره‌های آب های زیر زمینی در کشور استرالیا ارائه کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که استفاده از این نوع آب شیرین کن از نظر اقتصادی به صرفه است و تاثیرات محیط زیستی کمی هم دارد(۴). از دیگر تحقیقات انجام شده، تحقیق چنگ و همکاران پیرامون تولید برق زمین گرمایی با استفاده از چاه‌های نفتی رها شده است. آن ها به کمک مدل سازی عددی روابط انتقال حرارت را روی یک چاه واقعی با عمق ۶۰۰۰ متر بررسی کردند. نتایج نشان داد که با مرور زمان در سیستم زمین گرمایی، دمای سیال خروجی از چاه رفته رفته کاهش می‌یابد تا به یک میزان ثابت برسد(۸).

در این میان چاه‌های نفت رها شده منبعی از انرژی زمین گرمایی می‌باشند که حفاری در آن‌ها برای استحصال نفت انجام شده است و نیازی به حفاری دوباره در آن‌ها وجود ندارد و با استفاده از مبدل‌های حرارتی می‌توان از انرژی زمین گرمایی موجود در این چاه ها استفاده نمود و از حرارت استحصال شده نیز برای شیرین سازی آب استفاده کرد. با این روش نه تنها از هزینه کلی انرژی زمین گرمایی کاسته می‌شود، بلکه منبع انرژی تجدید پذیری در سیستم آب شیرین کن مورد استفاده قرار می گیرد. با توجه به مسئله بحران آب در ایران و پایان پذیر بودن سوخت‌های فسیلی استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر در فرآیند آب شیرین کن ضروری به نظر می‌رسد(۹). در این پژوهش به ارزیابی آب شیرین کن زمین گرمایی با استفاده از حرارت چاه نفت رها شده پرداخته می‌شود و روش مناسب شیرین سازی آب انتخاب می-گردد. پس از آن به طراحی این نوع آب شیرین پرداخته می‌شود و سپس این فرآیند بهینه سازی می‌شود. نوآوری این تحقیق استفاده از چاه‌های نفتی رها شده به عنوان منبع انرژی برای فرایند شیرین سازی آب می‌باشد. اهمیت این تحقیق از آنجا ناشی می‌شود که تا کنون چاه های نفت رها شده برای تولید آب شیرین مورد استفاده قرار نگرفته اند.

روش مورد استفاده برای انجام شبیه سازی فرآیند آب شیرین کن با استفاده از چاه نفت رها شده

این پژوهش شامل۳ گام اصلی می باشد.

گام اول: جمع آوری اطلاعات چاه نفت، با استفاده از روش شیرین سازی چند مرحله‌ای (MED)

برای این منظور با بررسی تحقیقات انجام شده، چاه نفت مناسب (با عمق ۳۸۶۱ متر با دمای اعماق چاه ۱۱۴/۵ درجه سلسیوس) با توجه به دبی و دمای آن انتخاب شده است و همچنین با بهینه سازی غیر خطی ماکزیمم حرارت استحصالی از چاه محاسبه شده است.

گام دوم: مدل سازی روش انتخابی و شبیه سازی

گام سوم: مدل سازی روش های افزایش تولید آب شیرین

در این جا بررسی تحقیقات انجام شده، روش های مختلف برای افزایش تولید آب شیرین بررسی شده اند و با توجه به معادلات موازنه جرم و انرژی هر کدام از این روش‌ها، معادلاتی به کد شبیه سازی شده در گام قبل افزوده شده است.

در این طرح با توجه به این که از حرارت استحصالی از چاه نفت رها شده استفاده می‌شود از فرآیندهای همراه با تغییر فاز یا همان فرآیندهای حرارتی استفاده می‌شود. از آن جا که روش‌های اصلی شیرین سازی حرارتی شامل تبخیر ناگهانی چند مرحله‌ای، شیرین سازی چند مرحله‌ای و تقطیر بخار متراکم می‌باشد(۱۰). روش تقطیر متراکم به دلیل کم استفاده بودن و همچنین این که در این طرح سیال خروجی به صورت مایع است و این که روش تقطیر متراکم در مرحله اول نیاز به بخار دارد، روش مناسبی نیست. دو روش تبخیر ناگهانی چند مرحله‌ای و شیرین سازی چند مرحله‌ای می توانند از مایع داغ به عنوان منبع حرارتی استفاده کنند. به طور کلی روش تبخیر ناگهانی چند مرحله‌ای در مقایسه با روش شیرین سازی چند مرحله‌ای به دمای منبع حرارتی بالاتری برای مرحله اول خود نیاز دارد. و از آن جایی که دمای خروجی از چاه که حدود ۱۱۴ تا ۱۲۰ درجه سانتی گراد است، انتخاب روش شیرین سازی چند مرحله‌ای به دلیل بازده ترمودینامیکی بالاتر و همچنین بالاترین دمای خروجی آب این فرآیند منطقی تر به نظر می‌رسد. آب شیرین کن‌های تجدید پذیر را بر اساس منبع انرژی به صورت آب شیرین خورشیدی، بادی و زمین گرمایی طبقه بندی کرد(۱۱):

معادلات حاکم در شبیه سازی فرآیند شیرین کن

معادلات بقای جرم و انرژی برای مرحله اول به صورت معادلات (۱)تا(۳) هستند (۱۲).

$$Q + m_dot_1^{brin} h_1^{brin} = m_dot_1^{stout} h_1^{stout} + m_dot_1^{brout} h_1^{brout} \quad (۱)$$

$$m_dot_1^{brin} = m_dot_1^{stout} + m_dot_1^{brout} \quad (۲)$$

$$x_1^{brin} m_dot_1^{brin} = x_1^{brout} m_dot_1^{brout} \quad (۳)$$

در این معادلات Q، m_dot ، h و x به ترتیب گرمای جذب شده از چاه نفت، دبی جریان، آنتالپی و غلظت نمک می‌باشد.

در این معادلات dis (Desalination) نشان دهنده آب شیرین شده است.

در این معادلات br نشان دهنده جریان پساب و st (Steam) نشان دهنده بخار است.

این معادلات برای مراحل ۲ تا ۱ -N می توانند به صورت معادلات (۴)تا(۶) بیان شوند:

$$m_dot_i^{brin} h_i^{brin} + m_dot_i^{stin} h_i^{stin} = m_dot_i^{brout} h_i^{brout} + m_dot_i^{stout} h_i^{stout} + m_dot_i^{dis} h_i^{dis} \quad (۴)$$

$$m_dot_i^{brin} = m_dot_i^{brout} + m_dot_i^{stout} \quad (۵)$$

$$x_i^{brin} m_dot_i^{brin} = x_i^{brout} m_dot_i^{brout} \quad (۶)$$

و همچنین معادله بقای انرژی و جرم برای مرحله آخر به صورت معادلات (۷) و (۸) است.

$$m_dot^{fdin} h^{fdin} + m_dot_{N-1}^{stin} h_{N-1}^{stin} = m_dot_N^{dis} h_N^{dis} + m_dot^{fdout} h^{fdout} \quad (۷)$$

$$m_dot^{fdin} + m_dot_{N-1}^{stin} = m_dot_N^{dis} + m_dot^{fdout} \quad (۸)$$

در این معادله fd (Feeding) نشان دهنده آب تغذیه می-باشد.

رابطه زیر نیز میزان تولید آب شیرین را در بقیه مراحل نشان می‌دهد(۱۳).

$$D_i = \frac{(D_{i-1} \cdot \lambda_{i-1}) - F_1 \cdot C_p \cdot (T_i - T_f)}{\lambda_i} \quad (۹)$$

در این رابطه D نشان دهنده آب تولید شده در مرحله اول، F نشان دهنده آب تغذیه و λ نشان دهنده گرمای نهان بخار است.

روابط (۱۰) و (۱۱) نیز موازنه جرم و شوری را در هر کدام از مراحل نشان می‌دهد. در این رابطه ها B نشان دهنده آب شور خروجی است.

$$B_i = F_i - D_i \quad (۱۰)$$

$$X_i = \frac{F_i \cdot x_f}{F_i - D_i} \quad (۱۱)$$

معادلات موازنه انرژی و جرم برای فلش باکس خارجی به صورت معادلات (۱۲) و (۱۳) است.

$$m_dot^d h^d = m_dot^{sofout} h^{sofout} + m_dot^{brout} h^{brout} \quad (۱۲)$$

$$m_dot^d = m_dot^{sofout} + m_dot^{brout} \quad (۱۳)$$

در این روابط d نشان دهنده آب شیرین تولیدی در هر مرحله است که وارد فلش باکس می‌شود. sof نشان دهنده بخار تولیدی در فلش باکس خارجی و br نشان دهنده آب بخار نشده است.

معادلات موازنه انرژی و جرم برای فلش باکس داخلی در معادلات (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است.

$$m_dot^f h^f = m_dot^{sifout} h^{sifout} + m_dot^{brout} h^{brout} \quad (۱۴)$$

$$m_dot^f = m_dot^{sifout} + m_dot^{brout} \quad (۱۵)$$

در این روابط f نشان دهنده آب تغذیه است و sif نشان دهنده بخار تولیدی در فلش باکس داخلی است.

با توجه به معادلات گفته شده و فرضیات مسئله فرآیند آب شیرین کن زمین گرمایی با استفاده از حرارت چاه نفت رها شده طراحی گردید. شبیه سازی معادلات با استفاده از نرم افزار Engineering Equation Solver صورت پذیرفته. در این طراحی تعداد ۱۲ مرحله و بیشینه دمای خروجی آب شور نیز ۶۶ درجه در نظر گرفته شده. همچنین نمک موجود در آب تغذیه برابر برابر ۳۵۰۰۰ppm است. بیشینه غلظت نمک مجاز برابر ۱۰۰۰۰۰ ppm در نظر گرفته می شود. در این طرح مقدار نمک مجاز در آب برابر با ۸۰۰۰۰ ppm فرض شده است.

جدول ۱- پارامتر های طرح

Table 2. Design parameters

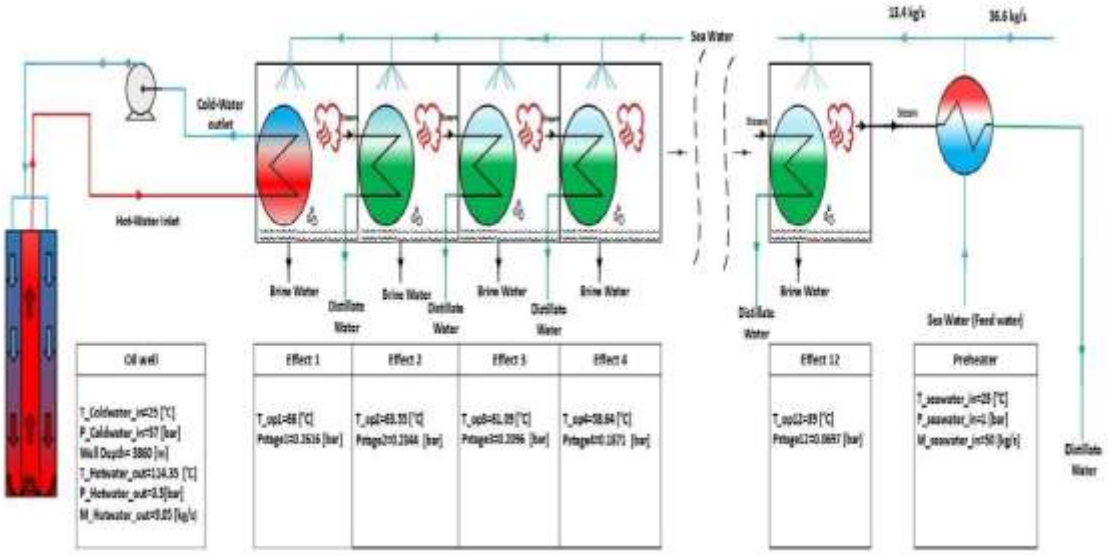
پارامتر	واحد	مقدار
دبی آب تغذیه	kg/s	۱۳/۴
دمای آب تغذیه	°c	۲۵
فشار آب تغذیه	bar	۱
عمق چاه نفت	m	۳۸۶۰
دمای جریان آب ورودی به چاه نفت	°c	۲۵
دمای آب گرم خروجی از چاه	°c	۱۱۴/۵
دبی اب گرم خروجی از چاه	Kg/s	۹/۰۵

یافته ها

سناریو۱: فرآیند آب شیرین کن زمین گرمایی چند مرحله ای مرسوم

ابتدا آب با دمای ۲۵ درجه سانتی گراد به وسیله‌ی پمپ به درون چاه تزریق می‌شود و با دمای ۱۱۴/۵ درجه سلسیوس از چاه خارج می‌گردد. این آب وارد مرحله اول فرآیند آب شیرین کن دمای عملیاتی ۶۶ درجه سانتی گراد، می‌شود. در این مبدل حرارتی، آب داغ حرارت خود را به جریان آب سرد انتقال می‌دهد. با توجه به شرایط خلا، این آب در دمایی کمتر از ۱۰۰ درجه سانتی گراد شروع به جوشیدن می‌کند و این بخار وارد مرحله بعد می‌شود و نقش جریان گرم در مبدل حرارتی مرحله بعد را ایفا می‌کند(۱۵). در مرحله دوم، بخار تولید شده در مرحله اول، وارد مرحله دوم شده و در حالی که حرارت خود را به آب شور دریا می‌دهد، کندانس می‌شود(۱۶).

این بخار وارد مرحله سوم شده و همین روند تا مرحله آخر ادامه می‌یابد.

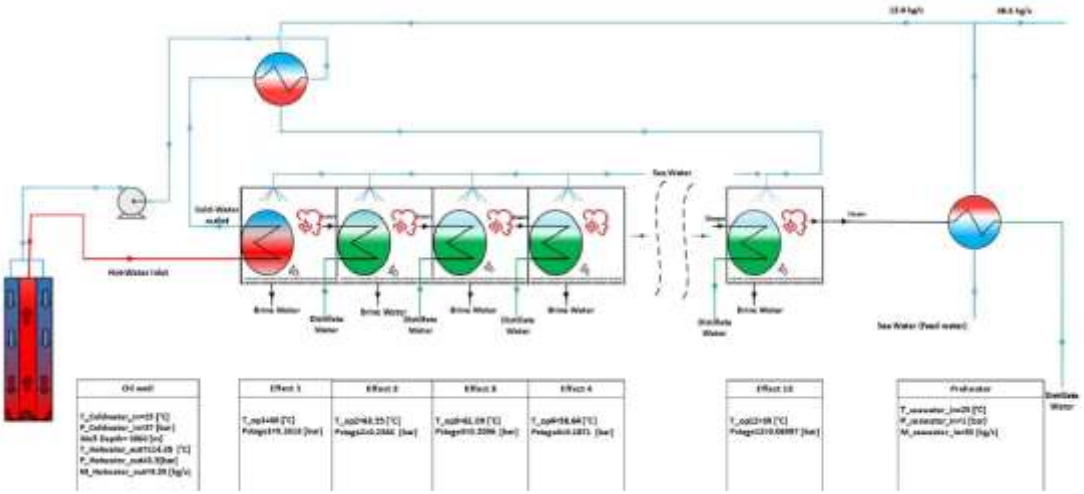


شکل ۱- شماتیک فرآیند آب شیرین کن زمین گرمایی چند مرحله ای مرسوم

Figure 1. Schematic of a conventional multi-stage geothermal desalination process

سناریو۲: فرایند آب شیرین کن زمین گرمایی چند مرحله ای به همراه پیش گرمایش ثانویه

آب خروجی از چاه نفت در مرحله اول مقداری از حرارت خود را در مبدل حرارتی به آب شور می‌دهد، اما این آب هنوز دارای دمای کافی برای پیش گرمایش آب تغذیه را داراست. با توجه به این مسئله با قرار دادن یک مبدل حرارتی دیگر، قبل از تزریق مجدد آب به چاه، از حرارت آن برای پیش گرمایش آب تغذیه استفاده می‌شود. با استفاده از این روش دمای آب تغذیه به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد و تاثیر زیادی در مقدار تولیدی آب شیرین داشته باشد.

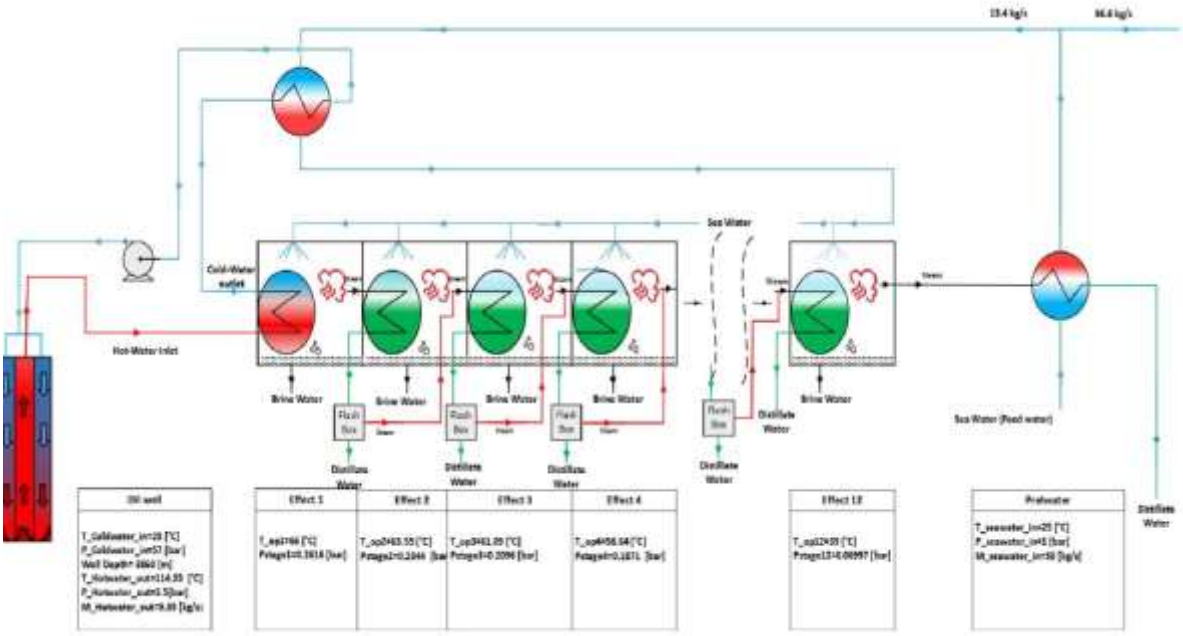


شکل ۲- شماتیک فرایند آب شیرین کن زمین گرمایی چند مرحله ای به همراه پیش گرمایش ثانویه

Figure 2. Schematic of multi-stage geothermal desalination process with secondary preheating

سناریو۳: فرایند آب شیرین کن زمین گرمایی به همراه پیش گرمایش ثانویه، فلش باکس خارجی

ساس کار فلش باکس بدین صورت است که آب با دما و فشار مشخص وارد این سیستم می‌شود. آب با وارد شدن به فلش باکس به صورت ناگهانی شروع به جوشش می‌کند(۱۷). در سیستم آب شیرین کن می‌توان از این ایده برای تولید بخار و افزایش انرژی حرارتی موجود در سیکل استفاده کرد (۱۸).

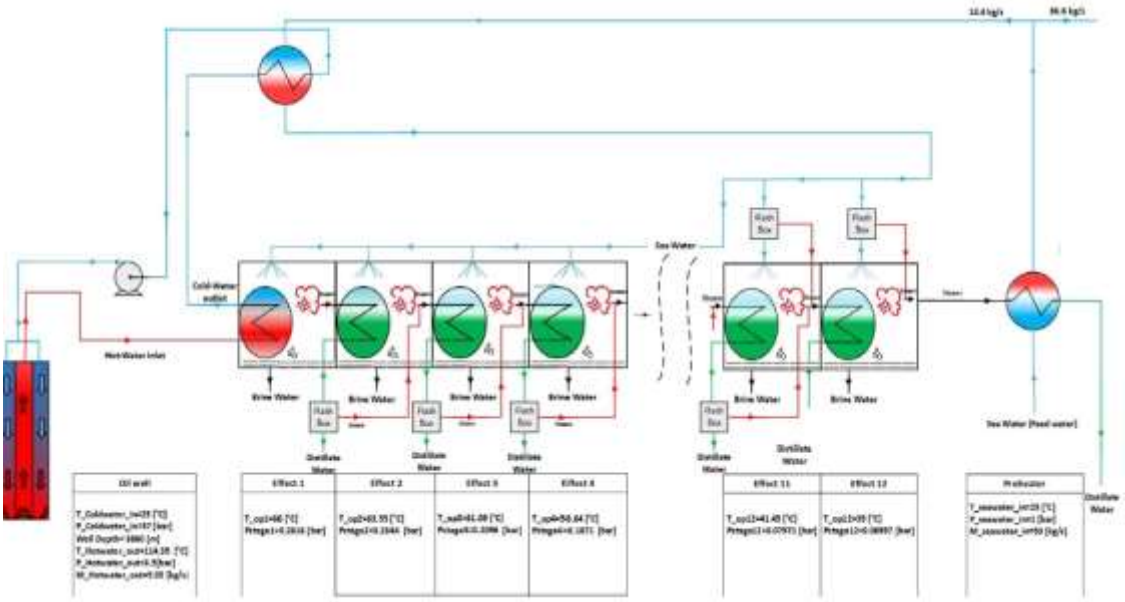


شکل۳- فرایند آب شیرین کن زمین گرمایی به همراه پیش گرمایش ثانویه، فلش باکس خارجی

Figure 3. Geothermal desalination process with secondary preheating, external flash box

سناریو۴: فرایند آب شیرین کن زمین گرمایی به همراه پیش گرمایش ثانویه، فلش باکس خارجی، فلش باکس داخلی

هر کدام از مراحل آب شیرین کن چند مرحله‌ای نسبت به مراحل قبلی دمای کمتری دارند. با توجه به قرار دادن پیش گرمایش ثانویه، دمای آب تغذیه در بعضی موارد به ۴۵ درجه سانتی گراد می رسد. این دما از دمای عملیاتی مراحل ۱۱،۱۰ و ۱۲ بیشتر است. به همین دلیل می‌توان با قرار دادن فلش باکس در ورودی آب تغذیه مقداری از این آب را بخار نمود.



شکل۴- فرایند آب شیرین کن زمین گرمایی به همراه پیش گرمایش ثانویه، فلش باکس خارجی، فلش باکس داخلی

Figure 4. Geothermal desalination process with secondary preheating, external flash box, internal flash

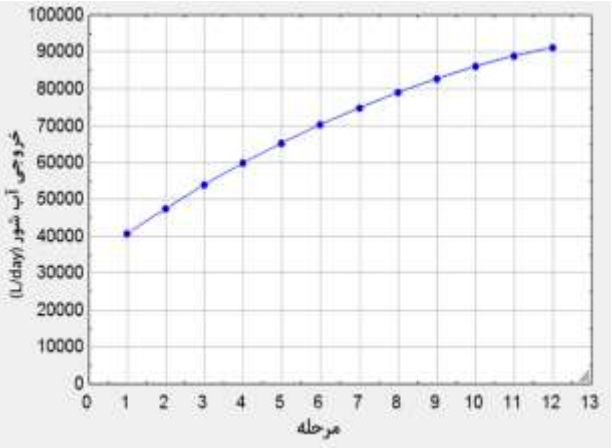
نتایج شبیه سازی فرآیند شیرین سازی چند مرحله‌ای مرسوم(سناریو۱)

با توجه به نتایج شبیه سازی میزان تولید آب در سناریو ۱ برابر با ۳۱۶۶۴۵ لیتر در روز است (جدول ۲).

جدول ۲- میزان تولید آب شیرین،آب شور و نمک مربوط به سناریو ۱

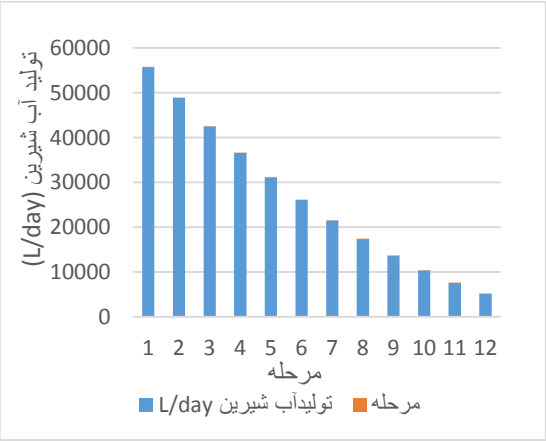
Table 2. Production of fresh water, salt water and salt related to scenario 1

مرحله	خروجی آب شور(لیتر در روز)	آب شیرین (لیتر در روز)	نمک آب خروجی(گرم بر لیتر)
۱	۴۰۷۶۸	۵۵۷۱۲	۸۲/۸۳
۲	۴۷۵۹۶	۴۸۸۸۴	۷۰/۹۵
۳	۵۳۹۶۸	۴۲۵۱۲	۶۲/۵۷
۴	۵۹۸۸۶	۳۶۵۹۴	۵۶/۳۹
۵	۶۵۳۵۴	۳۱۱۲۶	۵۱/۶۷
۶	۷۰۳۷۶	۲۶۱۰۴	۴۷/۹۸
۷	۷۴۹۵۶	۲۱۵۲۴	۴۵/۰۵
۸	۷۹۰۹۶	۱۷۳۸۴	۴۲/۶۹
۹	۸۲۸۰۰	۱۳۶۸۰	۴۰/۷۸
۱۰	۸۶۰۷۴	۱۰۴۰۸	۳۹/۲۳
۱۱	۸۸۹۱۴	۷۵۶۶	۳۷/۹۸
۱۲	۹۱۳۳۰	۵۱۵۰	۳۶/۹۷
	تولید آب شیرین	۳۱۶۶۴۵	



شکل۵- میزان آب شور خروجی در هر کدام از مراحل سناریو۱

Figure 5. The amount of saline water output in each of the stages of scenario 1



شکل۶- میزان آب شیرین در هر کدام از مراحل سناریو۱

Figure 6- The amount of fresh water production in each of the stages of scenario 1

میزان شوری نمک به جز در مرحله اول که از میزان مجاز بیشتر است در مراحل بعدی از مقدار مجاز کمتر است (شکل ۵). دلیل این موضوع این است که در مرحله اول بیشترین مقدار تولید بخار را داریم و همین موضوع باعث شده است که نمک از میزان مجاز افزایش یابد مشخص است میزان تولید آب شیرین در مرحله اول از تمامی مراحل بیشتر است و این مقدار همراه با افزایش مرحله کاهش می‌یابد (شکل۶). دلیل کاهش این موضوع است که منبع

حرارتی مرحله اول که همان آب چاه نفت می‌باشد از مقادیر دیگر مراحل بیشتر است.

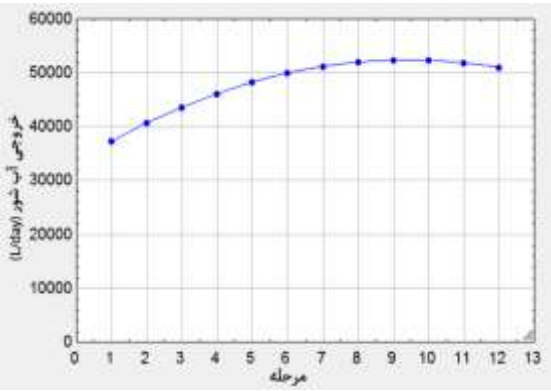
نتایج شبیه سازی شیرین سازی چند مرحله ای با پیش گرمایش ثانویه(سناریو ۲)

در این روش با توجه به این که قرار دادن پیش گرمایش ثانویه تولید آب شیرین به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد (جدول۳).

جدول ۳- میزان تولید آب شیرین ، آب شور و نمک سناریو۲

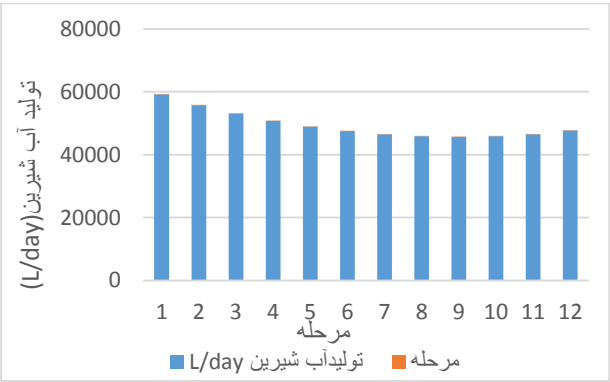
Table 3. Production of fresh water, salt water and salt Scenario 2

مرحله	خروجی آب شور (لیتر بر روز)	آب شیرین (لیتر بر روز)	درصد افزایش تولید آب شیرین نسبت به سناریو ۱	نمک آب خروجی (گرم بر لیتر)
۱	۳۷۳۲۳	۵۹۱۵۷	۰/۰۶	۹۰/۴۸
۲	۴۰۷۲۵	۵۵۷۵۵	۰/۱۴	۸۲/۹۲
۳	۴۳۶۸۷	۵۲۷۹۳	۰/۲۴	۷۷/۳۰
۴	۴۶۲۱۲	۵۰۲۶۸	۰/۳۷	۷۳/۰۷
۵	۴۸۳۰۵	۴۸۱۷۵	۰/۵۴	۶۹/۹۱
۶	۴۹۹۶۹	۴۶۵۱۱	۰/۷۸	۶۷/۵۸
۷	۵۱۲۰۶	۴۵۲۷۴	۱/۱۰	۶۵/۹۵
۸	۵۲۰۲۱	۴۴۴۵۹	۱/۵۵	۶۴/۹۱
۹	۵۲۴۱۶	۴۴۰۶۴	۲/۲۲	۶۴/۴۲
۱۰	۵۲۳۹۵	۴۴۰۸۵	۳/۲۱	۶۴/۴۵
۱۱	۵۱۹۶۰	۴۴۵۲۰	۴/۷۸	۶۴/۹۹
۱۲	۵۱۱۱۴	۴۵۳۶۶	۷/۴۶	۶۶/۰۶
	تولید آب شیرین	۵۸۰۴۲۸		



شکل۷- میزان آب شور خروجی در هر کدام از مراحل سناریو۲

Figure 7. Amount of saline water output in each of the stages of scenario 2



شکل۸- میزان تولید آب شیرین در هر کدام از مراحل سناریو۲

Figure 8. The amount of fresh water production in each of the stages scenario 2

با توجه به شکل۷، میزان تولید آب شیرین در مرحله اول بیشترین مقدار است، دلیل این موضوع نیز این است که در مرحله اول، آب گرم خروجی از چاه نفت بیشترین حرارت را برای تولید آب شیرین داراست، به همین دلیل در این مرحله بیشترین مقدار بخار تولید می‌شود. به همین دلیل با افزایش مرحله مقدار تولید بخار کاهش می‌یابد. شکل۸ نیز میزان تولید آب شور هر کدام از مراحل را بر حسب لیتر در روز نشان می‌دهد. همان طور که انتظار می‌رفت در مرحله اول که بیشتر مقدار تولید بخار را داریم میزان تولید آب شور خروجی نیز کمترین مقدار خود را داراست. این مقدار تا زمانی که میزان تولید بخار کاهش می‌یابد افزایش می‌یابد و سپس با افزایش مقدار تولید بخار این مقدار نیز در مراحل آخر روند نزولی پیدا می‌کند.

نتایج شبیه سازی شیرین سازی چند مرحله ای با پیش گرمایش ثانویه و فلش باکس خارجی(سناریو ۳)

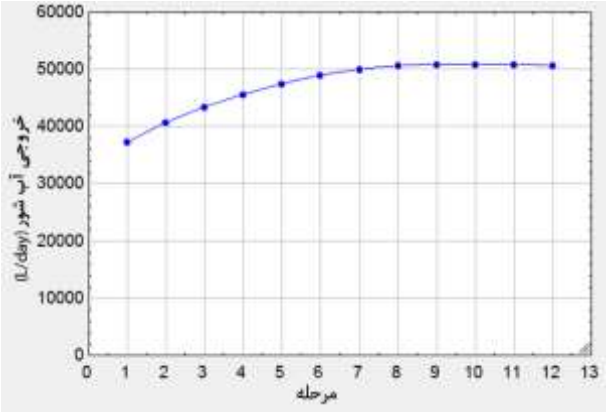
با اضافه کردن فلش باکس خارجی به فرآیند قبل علاوه بر بخاری که در هر مبدل تولید می‌شود، مقداری بخار دیگر نیز از آب شیرین شده به وسیله فلش باکس تولید می‌شود. این بخار به همراه بخار تولیدی در مبدل وارد مرحله بعد می‌شود. میزان تولید آب شیرین در این حالت به۵۹۰۰۱۴ لیتر در روز افزایش یافته است(جدول۴).

جدول۴- میزان تولید آب شیرین، آب شور و نمک در سناریو ۳

Table 4. Production of fresh water, salt water and salt in scenario 3

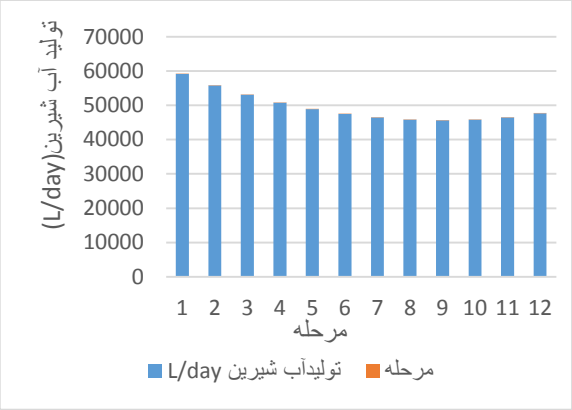
مرحله	خروجی آب شور (لیتر بر روز)	آب شیرین (لیتر بر روز)	درصد افزایش تولید آب شیرین نسبت به سناریو ۲	نمک آب خروجی (گرم بر لیتر)
۱	۳۷۳۲۳	۵۹۱۵۷	۰/۰۰	۹۰/۴۸
۲	۴۰۷۲۵	۵۵۷۷۰	۰/۰۰	۸۲/۹۲
۳	۴۳۴۲۸	۵۳۰۶۴	۰/۰۱	۷۷/۷۶
۴	۴۵۷۱۱	۵۰۷۹۹	۰/۰۱	۷۳/۸۷
۵	۴۵۷۷۴	۴۸۹۱۵	۰/۰۱	۷۰/۹۸
۶	۴۹۰۱۹	۴۷۴۶۸	۰/۰۲	۶۸/۸۹
۷	۵۰۰۴۷	۴۶۴۳۸	۰/۰۲	۶۷/۴۸
۸	۵۰۶۵۹	۴۵۸۲۴	۰/۰۳	۶۶/۶۶
۹	۵۰۸۵۷	۴۵۶۲۴	۰/۰۳	۶۶/۴
۱۰	۵۰۸۲۹	۴۵۶۵۱	۰/۰۳	۶۶/۴۳
۱۱	۵۰۸۰۱	۴۵۶۷۹	۰/۰۴	۶۶/۴۷
۱۲	۵۰۷۷۲	۴۵۹۰۴	۰/۰۴	۶۶/۵۱
	تولید آب شیرین کل	۵۹۰۰۱۴		

شکل ۹ نیز میزان تولید آب شیرین نشده در هر مرحله را نشان می‌دهد. همان طور که انتظار می‌رفت روند این نمودار مانند روش پیش گرمایش ثانویه است با این تفاوت که در مرحله‌هایی که در آن از فلش باکس استفاده شده است، میزان تولید آب شور کمتر بوده و به عبارتی بخار بیشتری تولید شده است. شکل ۱۰ میزان تولید آب شیرین بر حسب لیتر در روز را برای هر کدام از مراحل این روش نشان می‌دهد. مطابق روش‌های قبل، در این روش نیز مرحله بیشترین سهم تولید آب را دارد. روند تولید آب در این روش نیز مانند روش پیش گرمایش ثانویه است با این تفاوت که در این روش میزان تولید نسبت به روش قبل در مراحلی که از فلش باکس خارجی در آن‌ها استفاده است، افزایش یافته است. میزان تولید آب شیرین در این حالت به ۵۹۰۰۱۴ لیتر در روز افزایش یافته است.



شکل۹- شوری آب خروجی در هر کدام از مراحل سناریو۳

Figure 9. Output water salinity in each of the steps of scenario



شکل۱۰- تولید آب شیرین در هر کدام از مراحل سناریو ۳

Figure 10. The amount of fresh water production in each of the stages of scenario 3

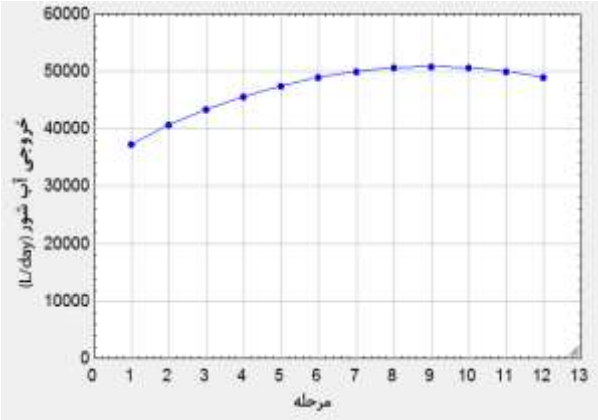
نتایج شبیه سازی شیرین سازی چند مرحله‌ای با پیش گرمایش ثانویه، فلش باکس خارجی و فلش باکس داخلی(سناریو۴) با افزایش فلش باکس داخلی به فرآیند مقدار تولید آب شیرین در مراحل ۱۰ به بعد به دلیل وجود فلش باکس داخلی افزایش می‌یابد. بخار تولید شده در مراحل دهم، یازدهم و دوازدهم به بخار ورودی به هر کدام از آن مراحل تزریق می‌شود تا بار حرارتی این مراحل افزایش یابد. لازم به ذکر است که بخار تولید شده در فلش باکس داخلی به دلیل این که از آب شور تغذیه این بخار تولید شده است به مجموع آب شیرین شده در فرآیند افزوده می‌شود(جدول۵)

جدول۵- میزان تولید آب شیرین ، آب شور و نمک مربوط به سناریو ۴

Table 5. Production of fresh water, salt water and salt related to scenario 4

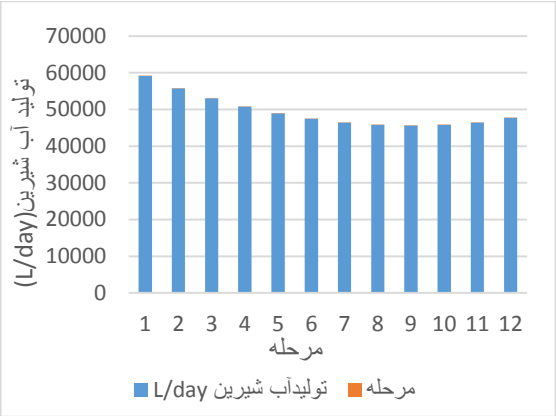
مرحله	خروجی آب شور (لیتر بر روز)	آب شیرین (لیتر بر روز)	درصد افزایش تولید آب شیرین نسبت به سناریو۳	نمک آب خروجی (گرم بر لیتر)
۱	۳۷۳۲۳	۵۹۱۵۷	۰/۰۰۰	۹۰/۴۸
۲	۴۰۷۲۵	۵۵۷۷۰	۰/۰۰۰	۸۲/۹۲
۳	۴۳۴۲۸	۵۳۰۶۴	۰/۰۰۰	۷۷/۷۶
۴	۴۵۷۱۱	۵۰۷۷۹	۰/۰۰۰	۷۳/۸۷
۵	۴۵۷۷۴	۴۸۹۱۵	۰/۰۰۰	۷۰/۹۸
۶	۴۹۰۱۹	۴۷۴۶۸	۰/۰۰۰	۶۸/۸۹
۷	۵۰۰۴۷	۴۶۴۳۸	۰/۰۰۰	۶۷/۴۷
۸	۵۰۶۵۹	۴۸۵۲۴	۰/۰۰۰	۶۶/۶۶
۹	۵۰۸۵۷	۴۵۶۲۴	۰/۰۰۰	۶۶/۴
۱۰	۵۰۶۴۲	۴۵۸۳۷	۰/۰۰۴	۶۶/۶۸
۱۱	۵۰۰۱۶	۴۶۴۶۲	۰/۰۱۷	۶۷/۵۱
۱۲	۴۸۹۷۹	۴۷۷۰۰	۰/۰۳۹	۶۸/۹۴
	تولید آب شیرین کل	۵۹۲۷۷۹		

شکل۱۱ میزان آب شور خروجی در هر مرحله را نشان می‌دهد. روند این شکل نیز مانند روند روش قبلی است. با این تفاوت که در سه مرحله آخر که فلش باکس داخلی افزوده شده است میزان آب شور خروجی کمتر شده است. شکل۱۲ میزان تولید آب شیرین در هر کدام از مراحل این فرآیند را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل نشان داده شده است در مرحله دهم، یازدهم و دوازدهم با اضافه شدن فلش باکس داخلی میزان تولید آب شیرین برابر ۵۹۲۷۷۹ لیتر در روز شده است.



شکل ۱۱- شوری آب خروجی در هر کدام از مراحل سناریو ۴

Figure 11. Salinity of effluent water in each of the steps of scenario 4



شکل۱۲- میزان تولید آب شیرین در هر کدام از مراحل سناریو۴

Figure 12. The amount of fresh water production in each of the stages of scenario 4

در این طرح تمام حرارت مورد نیاز تولید آب شیرین از حرارت زمین که یک انرژی تجدید پذیر و بدون تولید آلودگی است تأمین میشود و تنها انرژی الکتریکی موردنیاز طرح که ۱/۵ کیلووات ساعت به ازای هر مترمکعب برای آب شیرین کن به روش شیرین سازی چندمرحله‌ای است(۱۹).

فرض سوخت نفت برای تأمین این انرژی الکتریکی از شبکه برق، مقدار تولید هر کدام از آلاینده‌ها به ترتیب برای CO_2، NOx و SOx برابر ۸۱۸، ۴، ۱۴/۲گرم بر کیلووات ساعت است (شکل۱۳). محاسبات نشان می‌دهد که برای تولید ۱۰۰۰ تن آب شیرین در روز نیاز به ۱۰۰۰۰ تن نفت در سال است(۲۱). حال اگر این مقادیر را برای طول عمر مفید یک نیروگاه آب شیرین کن که حدود ۲۰ سال است محاسبه کنیم، آب شیرین کن زمین گرمایی حدود ۶۶۹۶۰ تن کمتر آلاینده CO_2 را نسبت به یک نیروگاه آب شیرین کن که با سیکل بخار یک نیروگاه تولید برق ترکیب شده است، تولید می کند (شکل ۱۴).

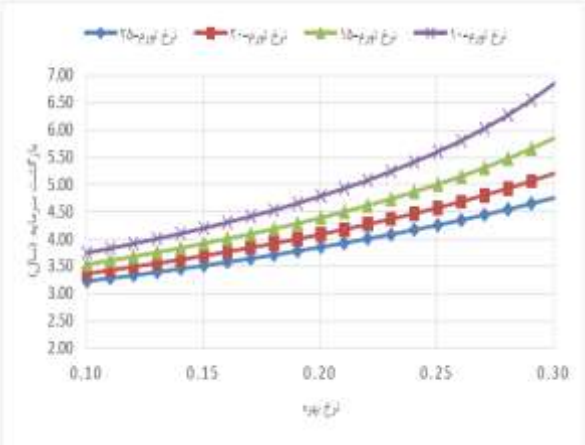
شکل۱۳- مقایسه تولید آلودگی سه تکنولوژی مختلف شیرین سازی

Figure 13. Comparison of pollution production of three different desalination technologies

شکل۱۴- مقایسه تولید آلاینده برای طول عمر مفید یک نیروگاه

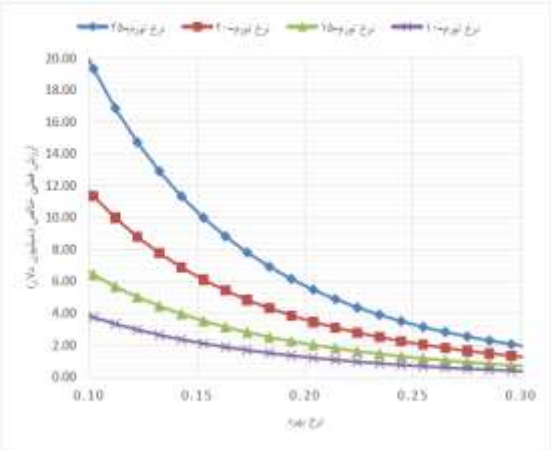
Figure 14. Comparison of pollutant production for the useful life of a power plant

حال با استفاده از روش ارزش فعلی به تحلیل اقتصادی فرآیند می‌پردازیم. شکل های ۱۵و ۱۶ میزان بازگشت سرمایه و ارزش فعلی خالص را برای ۵ نرخ تورم متفاوت نشـــان می‌دهد. با افزایش نرخ تورم، هزینه های عملیاتی افزایش می یابد. اما از طرف دیگر با افزایش نرخ تورم، قیمت آب قابل فروش تحت تاثیر تورم قرار می‌گیرد. به همین دلیل با افزایش نرخ تورم، میزان بازگشت سرمایه طرح نیز کاهش می‌یابد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود به ازای نرخ‌های بهره کمتر از ۳۰ درصد بازگشت سرمایه نیز کمتر از ۵ سال است.



شکل۱۵- مقایسه زمان بازگشت سرمایه به ازای نرخ های تورم مختلف

Figure 15. Comparison of return on capital for different inflation rates



شکل۱۶- مقایسه ارزش فعلی خالص به ازای نرخ های تورم مختلف

Figure 16. Comparison of net present value for different inflation

بحث و نتیجه گیری

محاسبات این تحقیق نشان داد که چاهی با دمای ۱۱۴/۵ درجه سلسیوس و دبی آب گرم خروجی از چاه $۹٫۰۵\frac{kg}{s}$ توانایی تولید ۳۱۶ متر مکعب آب شیرین در طول روز را دارد. نتایج نشان داد که استفاده از یک پیش گرمایش ثانویه و بالا بردن دمای آب تغذیه تاثیر زیادی در میزان تولید آب شیرین در هر کدام مراحل شیرین سازی دارد. میزان تولید آب شیرین با استفاده از پیش گرمایش ثانویه ۵۸۰ متر مکعب در روز محاسبه شد. در این طرح با قرار دادن فلش باکس در مسیر آب شیرین تولید شده، میزان تولید آب شیرین به ۵۹۰ متر مکعب در روز رسید که نسبت به حالت قبل ۱۰ متر مکعب، تولید آب افزایش یافته است. استفاده از فلش باکس در مسیر آب تغذیه نیز می‌تواند به تولید بیشتر آب شیرین کمک کند و میزان تولید آب شیرین به ۵۹۲ متر مکعب در روز می‌رسید. همچنین نتایج تحلیل اقتصادی این تحقیق نشان داد که به ازای نرخ‌های تورم گفته شده ارزش فعلی خالص به ترتیب به ازای نرخ بهره‌های ۲۹٪،۴۴٪،۴۹٪ و۵۴٪ برابر با صفر می‌شود. به عبارت دیگر ارزش فعلی خالص نشان می‌دهد که در نرخ بهره‌های کمتر از این، طرح اقتصادی به صرفه است.

References

1. Bebran, Siddique; Honarbakhsh, Nazli; Water crisis in Iran and the world. (In Persian)
2. http://www.americansecurityproject.org/a-coming-water-crisis/.
3. Raluy, R., et al., Life-cycle assessment of desalination technologies integrated system Desalination, 2015. 356:p. 94-114.
4. Christ, A., et al., Techno-economic analysis of geothermal desalination using Hot Sedimentary Aquifers: A pre-feasibility study for Western Australia. Desalination, 2017. 404: p. 167-181.
5. Noorollahi, Y., et al., Numerical simulation of power production from abandoned oil wells in Ahwaz oil field in southern Iran. Geothermics, 2015. 55: p. 16-23.
6. Ghaffour, N., et al., Renewable energy-driven desalination technologies: a comprehensive review on challenges and potential applications of integrated systems. Desalination, 2015. 356: p. 94 -111.
7. Hanafi, A., et al., Thermo-Economic Analysis of Combined Cycle MED-TVC Desalination System. Energy Procedia, 2015. 75: p. 1005 -1020.
8. Cheng, W.-L., et al., Studies on geothermal power generation using abandoned oil wells. Energy, 2013. 59: p. 248-254.
9. Druetta, P., P. Aguirre, and S. Mussati, Optimization of multi-effect evaporation desalination plants. Desalination, 2017. 311: p. 1-15.
10. Al-Karaghouli, A.A. and L. Kazmerski, Renewable energy Opportunities in water desalination. Desalination, Trends and Technologies, 2017: p. 149-184.
11. Gohari, A., et al., Water transfer as a solution to water shortage: a fix that can backfire. Journal of Hydrology, 2013. 491: p. 23-39.
12. Kalogirou,S., Survey of solar desalination systems and system selection. energy, 1997. 22(1): p. 69-81.
13. Al-Mutaz, I.S. and I. Wazeer, Comparative performance evaluation of conventional multi- effect evaporation desalination processes. Applied Thermal Engineering, 2014. 73(1): p. 1194 -1203.
14. El-Dessouky, H.T., H.M. Ettouney, and F. Mandani, Performance of parallel feed multiple effect evaporation system for seawater desalination. Applied

Thermal Engineering, 2000. 20(17): p. 1679-1706.

15. Blanco, J., et al., Review of feasible solar energy applications to water processes. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009. 13(6): p. 1437-1449.
16. Clayton, R., A review of current knowledge, Desalination for water supply. foundation for water research, 2011.
17. Grubert, E.A., A.S. Stillwell, and M.E. Webber, Where does solar-aided seawater desalination make sense? A method for identifying sustainable sites. Desalination, 2014. 339: p. 10-17.
18. Dessouky, H.T. and H.M. Ettouney, Fundamentals of salt water desalination. 2002: Elsevier.
19. Lattemann, S. and T. Höpner, Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. Desalination, 2008. 220(1-3): p. 1-15.
20. Akella, A., R. Saini, and M.P. Sharma, Social, economical and environmental impacts of renewable energy systems. Renewable Energy, 2009. 34(2): p. 390-396.
21. Kalogirou, S.A., Seawater desalination using renewable energy sources. Progress in energy and combustion science, 2005. 31(3): p. 242-281.