

## امکان سنجی استفاده از آب تصفیه شده واحد پساب صنعتی در قالب جریان جبران ساز در صنایع نفت و گاز

سید مهدی شریعتمدار مرتضوی<sup>۱\*</sup>، افشین بهروزی اصفهانی<sup>۲</sup>، رسول ضیغم زاده الیادرائی<sup>۳</sup>  
 ۱- کارشناس فناوری، شرکت پالایش نفت بندرعباس، بندرعباس، ایران  
 ۲- رئیس پژوهش و فناوری، شرکت پالایش نفت بندرعباس، بندرعباس، ایران  
 ۳- مسئول مهندسی دستگاه‌های آب و بخار، شرکت پالایش نفت بندرعباس، بندرعباس، ایران  
 دریافت: ۹۲/۸/۲۸ پذیرش: ۹۲/۱۲/۱۰

### چکیده

امروزه مبحث نگهداشت انرژی به عنوان یک گزینه کلیدی در امر کاهش قیمت محصول مطرح است که نتیجه آن ایجاد زمینه برای رقابت است. در این مقاله، آب خروجی از واحد پساب، به عنوان یکی از منابع انرژی، با هدف استفاده مجدد در صنعت نفت و گاز بررسی شد. بدین منظور، دو حالت استفاده از فناوری جدید با هدف شیرین‌سازی آب تصفیه شده و استفاده مستقیم بدون کاربرد فناوری جدید در نظر گرفته شد. طبق بررسی‌های مفهومی و اقتصادی، گزینه‌های مطلوب برای استفاده از فناوری جدید و کاربرد مستقیم، به ترتیب اسمز معکوس و کاربرد در قالب جریان جبران‌ساز برج خنک‌کننده انتخاب شدند. با انتخاب فناوری اسمز معکوس و صرف هزینه کل سرمایه‌گذاری برابر ۷/۹ میلیون دلار، به منظور شیرین‌سازی ۱۶۰ مترمکعب در ساعت آب تصفیه‌شده واحد پساب، در نهایت قیمت تمام شده هر متر مکعب آب شیرین تولید شده ۳/۵۲ دلار و برگشت سرمایه سه سال برآورد می‌شود.

**کلمات کلیدی:** مطالعه امکان‌سنجی، شیرین‌سازی پساب صنعتی، اسمز معکوس، الکترودیالیز، بررسی اقتصادی

### مقدمه

از دیدگاه غلظت کل جامدات محلول (TDS) در آب، دسته‌بندی زیر در این مطالعه لحاظ شده است [۲]:  
 - آب شرب (PW) در محدوده زیر ۵۰۰ ppm  
 - آب با درصد کم نمک (لب‌شور) (BRW) در محدوده ۵۰۰ تا ۳۰۰۰۰ ppm  
 - آب با درصد نمک متوسط (SW) در محدوده ۳۰۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰ ppm  
 - آب با درصد نمک بالا (BW) در گستره بالاتر از ۵۰۰۰۰ ppm

به مبحث شیرین‌سازی آب به عنوان یکی از روش‌های پرهزینه موجود در زمینه تولید آب برای مصارف عمومی و صنعتی توجه شده است. اغلب از روش‌های شیرین‌سازی آب در مواقع زیر استفاده می‌شود [۱]:  
 - عملاً جایگزین دیگری وجود نداشته باشد.  
 - روش‌های دیگر با هزینه بالاتر موجود باشند.  
 - انرژی با هزینه تمام شده پایین در دسترس باشد.  
 - شاخص‌های بهداشتی و زیست‌محیطی بر شاخص‌های مالی و اقتصادی برتری داشته باشد.

\* RnD@baorco.ir

### - تقطیر ناگهانی چندمرحله‌ای [۱]

این فناوری براساس دو فرایند فیزیکی تبخیر و میعان استوار است. پدیده غالب در عملکرد این فناوری انتقال حرارت به واسطه ایجاد اختلاف دما طی مراحل متعدد است.

### - تقطیر فیلمی چندمرحله‌ای [۱]

در این فناوری نیز، مشابه نوع قبلی، از دو فرایند فیزیکی تبخیر و میعان استفاده می‌شود. تفاوت عمده این فناوری با روش قبلی در نحوه فرایند تبخیر خوراک و پدیده انتقال حرارت است.

### - اسمز معکوس [۵]

برای اولین بار در دهه ۷۰ میلادی، این فناوری به عنوان یک فناوری جدید به خدمت گرفته شد. در فرایند اسمز معکوس، با اعمال فشار و گذر آب شور از غشاء، آب شیرین حاصل می‌شود. محدودیت اصلی در این فرایند، انرژی لازم برای تحت فشار قرار دادن خوراک است.

### - فناوری الکترودیالیز [۵]

برای اولین بار در دهه ۶۰ میلادی، این فناوری ارائه شد. خوراک ورودی به این فرایند آب با شوری کم (تا ۵۰۰۰ ppm) است. در این فناوری، با عبور آب شور از بین دو الکترو، آنیون‌ها توسط غشای گزینشی کاتیون جذب شده و عکس این حالت در الکترو دیگتر رخ می‌دهد که در نهایت آب شیرین تولید می‌شود.

### بررسی مفهومی [۱ و ۵ و ۶]

به طور کلی، وضعیت استفاده از فناوری‌های مذکور ضمن لحاظ کردن مشخصات خوراک و فرایند تبخیر آن، رسوبات و تمیزکاری تجهیزات، نسبت عملکرد آب تولیدی به بخار مصرفی، انرژی و ارتقای فناوری به شرح زیر است:

#### ۱- فناوری تقطیر آب شور

• فناوری اثبات شده و بالغ از جهت اعتمادپذیری بالا ضمن تخصیص ۶۰ درصد از حجم تقاضای بازار جهانی و ۸۰ درصد از سهم بازار خاورمیانه (انعطاف‌پذیری MED نسبت به MSF

البته این تقسیم‌بندی در مراجع مختلف متفاوت است. لیکن وجه مشترک همگی آن‌ها لحاظ کردن چهار نوع آب مرتبط با فرایندهای شیرین‌سازی است. شایسته ذکر است، غالباً آب شرب در محدوده فرایندهای شیرین‌سازی قرار نمی‌گیرد در حالی که سه نوع دیگر در قالب جریان‌های ورودی و خروجی با فرایندهای شیرین‌سازی در ارتباط است. معمولاً آب با غلظت بالای ۵۰۰۰۰ ppm به عنوان محصول جانبی از فرایندهای شیرین‌سازی خارج می‌شود که البته از دیدگاه زیست‌محیطی حائز اهمیت ویژه‌ای است. از طرفی این آب می‌تواند با رویکرد تخلیه صفر مایع (ZLD) به محیط زیست، به عنوان خوراک وارد مراحل دیگر تغلیظ‌سازی شود و در پایان محصول جامد نمک از فرایندهای زنجیره‌ای متوالی خارج شود.

مشابه بسیاری از فناوری‌ها، فناوری شیرین‌سازی آب نیز دارای فواید و محدودیت‌هایی است که از جمله آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۳، ۴، ۵]:

#### • فواید

- ۱- افزایش و ایجاد تنوع در منابع تأمین آب شرب
- ۲- حفظ و نگهداشت منابع آب زیرزمینی و حتی جایگزین مناسب برای آب‌های زیرزمینی

#### • محدودیت‌ها

- ۱- هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری و تولید
- ۲- مصرف بالای انرژی
- ۳- نگرانی‌های زیست‌محیطی، از جمله تخلیه آب فوق شور به محیط زیست

### فناوری‌های شیرین‌سازی متداول در صنعت

در سال ۱۹۵۸، برای اولین بار، استفاده از فرایند شیرین‌سازی در منطقه خلیج فارس در کویت صورت پذیرفت. نوع فناوری به کار گرفته‌شده تقطیر ناگهانی چندمرحله‌ای (MSF) با ظرفیت ۴۵۰۰ مترمکعب در روز بود. به طور کلی، امروزه استفاده از چهار فناوری در زمینه شیرین‌سازی آب متداول است که عبارت است از: "تقطیر ناگهانی چندمرحله‌ای"، "تقطیر فیلمی چندمرحله‌ای (MED)"، "اسمز معکوس (RO)" و "الکترودیالیز (ED)" [۱].

- امکان استفاده از روش‌های ارتقای فناوری، از جمله تغلیظ‌کننده‌های آب شور در جهت کاهش هزینه‌های تمام‌شده
- بهترین گزینه برای آب‌های با شوری کم و متوسط
- نیاز به هزینه‌های تحمیلی پیش و پس تصفیه‌ای، به دلیل حساسیت بالای غشاهای استفاده‌شده، نسبت به مواد جامد محلول در آب
- امکان تعدیل هزینه استفاده از فرایند پیش‌تصفیه با لحاظ کردن مشخصه بازده بالا در بازیافت آب شیرین
- استفاده از روش ترکیبی پیش‌تصفیه اولترافیلتراسیون و اسمز معکوس به عنوان مقرون به صرفه‌ترین روش شیرین‌سازی آب‌های با شوری کم و متوسط
- طراحی با ترکیب‌بندی‌های متنوع به صورت فشرده
- کوتاه بودن زمان ساخت و نصب نسبت به دیگر فناوری‌های شیرین‌سازی
- قابلیت تبدیل وضعیت از ظرفیت پایین به بالا برحسب تقاضا

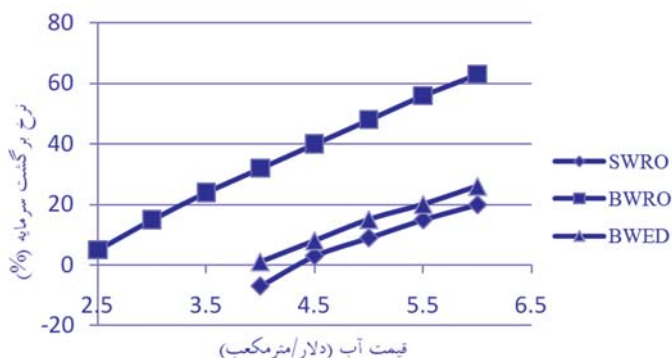
### مدیریت جریان تغلیظ‌شده [۵]

با توجه به شرایط محیطی و عملکردی، علاوه بر مبحث شیرین‌سازی آب و استفاده از فناوری بهینه، مبحث مدیریت جریان تغلیظ‌شده خروجی از این فرایند نیز، باید به عنوان یک شاخص عملکرد زیست‌محیطی مدنظر قرار گیرد. جریان تغلیظ‌شده را می‌توان به روش‌هایی از قبیل تخلیه به آب‌های سطحی، تخلیه به جریان فاضلاب، کاربردهای ساخت‌وساز و عمرانی، تخلیه به حوضچه‌های تبخیرساز، تزریق در چاه‌های عمیق، استفاده در فرایند تخلیه صفر مایع به محیط (تولید بلورهای جامد) و مخلوط‌سازی با جریان‌های دیگر برای استفاده مجدد یا جریان برگشتی در سامانه امحاء کرد. با توجه به انجام پروژه پژوهشی [۱۰] و اثبات این موضوع که در ارسال جریان برگشتی به دریا ملاحظات زیست‌محیطی کاملاً رعایت شده است و از طرفی، نسبت حجمی جریان تغلیظ‌شده به کل جریان برگشتی ناچیز است (تقریباً ۱ به ۶۰۰۰)، از این رو، نوسانات غلظت و دمای جریان برگشتی قابل اغماض است [۱۰].

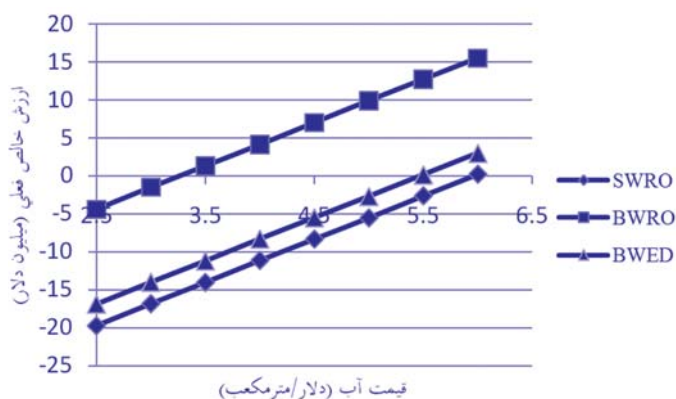
- بالتر است ولی دارای محدودیت دریافت خوراک تا ۲۲۷۳۰ مترمکعب در روز است.)
- انرژی مصرفی بالا (نوع MED نسبت به MSF مصرف انرژی پایین‌تر و ظرفیت بالاتر را در نتیجه اعمال طرح‌های ارتقا به همراه دارد).
  - عدم استفاده برای آب‌های با مشخصه شوری کم و متوسط
  - گزینه برتر در حالت ظرفیت بالای خوراک و قیمت تمام‌شده پایین از دیدگاه حفظ انرژی
  - گزینه برتر در خاورمیانه به لحاظ پایین بودن هزینه سوخت و استفاده از آب دریا، به عنوان خوراک، نسبت به فناوری‌های رقیب از جمله اسمز معکوس (MED حتی قابلیت ایجاد سامانه ترکیبی با فناوری اسمز معکوس را داراست به نحوی که قیمت تمام‌شده انرژی را در حد متوسط تعدیل می‌کند).
  - عمر بالای تجهیز فراتر از میزان تخمین‌زده شده (۱۵ سال)
  - عملیات ساده حاکم بر فرایند
  - کاهش نامحسوس عملکرد سامانه از جهت مصرف انرژی و کیفیت آب شیرین تولیدی طی سالیان متوالی
  - کاهش هزینه ساخت به‌رغم افزایش محسوس هزینه مواد اولیه و دستمزد به دلایل زیر:
  - وجود رقابت شدید بین فناوری‌های تقطیری و اسمز معکوس
  - بهبود، ارتقا و بهینه‌سازی طراحی، با رویکرد ارائه راه‌حل‌های فنی، با سرمایه‌گذاری روی تجربیات گذشته
  - مشخصات فنی غالباً ساده و در دسترس، بدون موانع محدودکننده
  - تغییر نوع قراردادها و ارائه پیشنهاد با تمرکز بر عنوان کردن مشخصات عملکردی (هزینه تمام شده آب و کل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه) به جای ذکر مشخصات فنی و جزئیات فرایندی (با این رویکرد امکان استفاده از تجربیات گذشته در جهت کاهش هزینه‌ها امکان پذیر است).

### ۲- فناوری غشایی [۱]

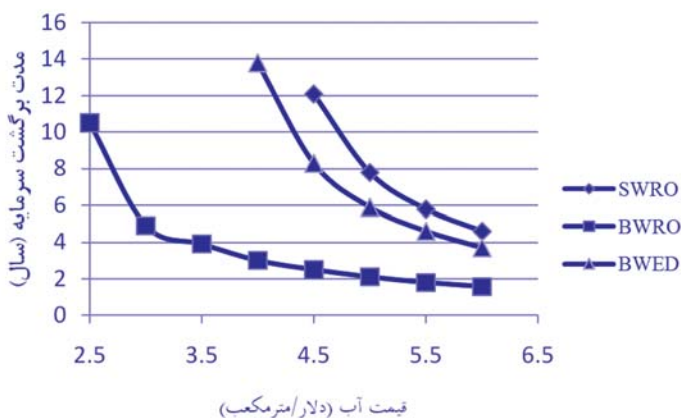
- صرفه‌جویی در هزینه‌های اولیه و عملیاتی
- مصرف انرژی پایین نسبت به دو فناوری قبلی
- عدم حساسیت بالا نسبت به قیمت تمام‌شده انرژی



شکل ۱: نرخ برگشت سرمایه (IRR) برای دو فناوری RO (آب دریا و آب لب‌شور) و ED



شکل ۲: ارزش خالص فعلی (NPV) برای دو فناوری RO (آب دریا و آب لب‌شور) و ED



شکل ۳: دوره برگشت سرمایه برای دو فناوری RO (آب دریا و آب لب‌شور) و ED

## محاسبات اقتصادی

جنبه‌های زیر بر هزینه تمام‌شده فرایند شیرین‌سازی تأثیرگذار است [۵]:

- میزان نمک‌گیری از آب شیرین (مشخصه نمک کمتر در آب شیرین هزینه را افزایش می‌دهد)
- ظرفیت واحد شیرین‌سازی (ظرفیت بالاتر از دید اقتصادی مقرون به صرفه‌تر است)

• انرژی موردنیاز (انرژی ۲۰ تا ۵۰ درصد از هزینه عملیاتی را به خود اختصاص می‌دهد) [۷]

• مدیریت جریان تغلیظ‌شده (۵ تا ۳۳ درصد از هزینه تمام‌شده آب تولیدی را به خود اختصاص می‌دهد) [۸]

• میزان و نوع فناوری و روش به خدمت‌گرفته شده برای مرحله پیش تصفیه

• قوانین موجود و الزامات مربوط به آن (فرایندی، قرارداد و محیط زیست)

• قیمت زمین

• هزینه انتقال خوراک و آب تولیدشده (هزینه پمپاژ، ذخیره، انتقال خوراک از محل دریافت و تخلیه محصول جانبی (آب فوق شور) به محل تخلیه، با توجه به زیرساخت‌های موجود

و فاصله، ۲۰ تا ۲۵ درصد هزینه سرمایه‌گذاری اولیه را به خود اختصاص می‌دهد) [۹]

با توجه به موارد بیان‌شده در بررسی مفهومی، در نهایت

دو روش اسمز معکوس و الکترودیالیز از نظر اقتصادی بررسی می‌شود. با استفاده از داده‌های جدول (۱)، برای قیمت‌های

متنوع آب شیرین‌سازی شده، میزان برگشت سرمایه، ارزش خالص فعلی و دوره برگشت سرمایه به ترتیب مطابق شکل‌های (۱، ۲ و ۳) است.

با توجه به شکل‌های (۱، ۲ و ۳)، استفاده از فناوری اسمز

معکوس برای آب خروجی از واحد پساب نسبت به فناوری الکترودیالیز مرجح‌تر است. این نکته نیز باید مدنظر قرار گیرد

که به هر حال استفاده از فناوری غشایی، نسبت به فناوری‌های تقطیری، به مراتب از هزینه سرمایه‌گذاری اولیه پایین‌تری برخوردار است.

جدول ۱: داده‌های مالی\* برای دو فناوری اسمز معکوس و الکترودیالیز [۱۱]

الکترودیالیز (آب بازیافت) BWED	اسمز معکوس (آب بازیافت) BWRO	اسمز معکوس (آب دریا) SWRO	مشخصه اقتصادی و فرایندی
۱۲/۵ میلیون دلار	۷/۹ میلیون دلار	۱۳/۴ میلیون دلار	<ul style="list-style-type: none"> <li>هزینه سرمایه‌گذاری کل</li> <li>• هزینه سرمایه‌گذاری ثابت</li> <li>✓ ساخت سیستم غشایی</li> <li>✓ طراحی و مهندسی</li> <li>✓ ساخت سیستم پیش‌تصفیه‌ای</li> <li>✓ ساخت سیستم دفع پساب</li> <li>✓ تجهیزات و تسهیلات پشتیبان تولید</li> <li>✓ دیگر هزینه‌ها</li> <li>• سرمایه در گردش</li> </ul>
۱۱	۷	۱۱/۸	
۵/۳۷	۳/۴	۳/۶۶	
۰/۵	۰/۴۸	۰/۸۱	
۰/۵	۰/۵	۱/۴۲	
۰/۰۵	۰/۲	۱/۳	
۳/۷۴	۱/۵۸	۳/۷۸	
۰/۸۴	۰/۸۴	۰/۸۴	
۱/۵	۰/۹	۱/۶	
۴ میلیون دلار در سال	۲/۳ میلیون دلار در سال	۴/۴ میلیون دلار در سال	<ul style="list-style-type: none"> <li>هزینه عملیات و بهره‌برداری</li> <li>• تعمیرات و نگهداری</li> <li>• موارد زیست محیطی</li> <li>• انرژی</li> <li>• نیروی کار</li> <li>• تعویض غشاء/الکتروود</li> <li>• مواد شیمیایی</li> <li>• دیگر موارد</li> </ul>
۰/۲۷	۰/۱۳	۰/۸	
۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۲۹	
۳/۲۵	۱/۶۵	۲/۶۷	
۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	
۰/۳۶	۰/۲۴	۰/۴۸	
۰/۰۵	۰/۱۵	۰/۲۶	
۰/۱	۰/۱	۰/۱	
%۹۰	%۸۰	%۳۰	میزان بازیافت آب
۱۶۰ متر مکعب در ساعت	۱۶۰ متر مکعب در ساعت	۱۶۰ متر مکعب در ساعت	دبی خوراک ورودی
۱۵۴ متر مکعب در ساعت	۱۵۴ متر مکعب در ساعت	۱۵۴ متر مکعب در ساعت	دبی محصول خروجی
<۱۰	<۲۰۰	<۵۰۰	TDS محصول در حداکثر بازده سامانه
۱ ماژول	۲ ماژول	۴ ماژول	تعداد ماژول‌های موردنیاز
۳۳۰ روز در سال	۳۳۰ روز در سال	۳۳۰ روز در سال	تعداد روزهای کاری
۱۵ سال	۱۵ سال	۱۵ سال	مدت زمان کارکرد
%۲۰	%۲۰	%۲۰	نرخ بهره جذب‌کننده

\* تمامی مقادیر مربوط به نیمه اول سال ۱۳۹۱ است.

بدیهی به نظر می‌رسد. چنانچه یک مخزن ذخیره یا استخر برای این منظور در نظر گرفته شود، آنگاه علاوه بر موارد استفاده از این مخزن در مصارف واحد آتش‌نشانی، می‌توان از آن نیز به عنوان یک منبع تأمین آب در شرایط اضطراری قطع برق واحد تأمین آب پالایشگاه استفاده کرد. به بیان دیگر، این مخزن می‌تواند به عنوان یک منبع کمکی جریان آب ورودی به پالایشگاه (هرچند مدت زمان اندک) مدنظر قرار گیرد. مثلاً، با داشتن یک مخزن ذخیره ۲۲ هزار بشکهای می‌توان حاشیه عملکرد سامانه‌های فرایندی را تحت شرایط اضطراری قطع برق واحد تأمین آب دریا تا شش دقیقه افزایش داد.

در خصوص ردیف (۲) از جدول (۲)، ارسال آب پساب به عنوان منبع تأمین‌کننده آب آبیاری برای فضای سبز مطرح شده است. با توجه به اینکه مقدار آب شرب مصرفی بالاتر از الگوی مصرف است و از طرفی، امکان آسیب رسیدن به فضای سبز طی سال‌های آتی خشکسالی بیش از پیش احساس می‌شود، ارسال آب خروجی از واحد پساب، با توجه به اجرای پروژه‌های مشابه در این زمینه و موجود بودن تجربیات و مدارک مکفی، مطمئناً فوایدی از جمله صرفه‌جویی در مصرف آب شرب، حفظ فضای سبز و حتی توسعه آن را در پی خواهد داشت. بدیهی است، مقادیر پارامترهای اقتصادی حاصل از اجرای این طرح در کوتاه‌مدت چندان رغبتی برای اجرای آن ایجاد نمی‌کند، ولی در نهایت مزایای زیر را در پی دارد:

- صرفه‌جویی در مصرف آب شرب برای استفاده در فرایند آبیاری
- حفظ و توسعه فضای سبز
- ایجاد روحیه شاد در کارکنان و کمک به ایجاد رضایتمندی آن‌ها در محل کار

در خصوص ردیف (۳) از جدول (۲)، استفاده تحت عنوان جریان جبران‌ساز در بویلرها بدون استفاده از فرایندهای پیش‌تصفیه‌ای و ارتقا امکان‌پذیر نیست. در این حالت، مبحث استفاده از فناوری‌های شیرین‌سازی آب مطرح می‌شود.

در خصوص نمک‌زداها، باید به این نکته اشاره داشت که یکی از منابع تأمین آب جبرانی در آن‌ها آب خروجی از واحد

از طرفی، تنها فناوری غشایی الکترودیالیز است که می‌تواند براساس مشخصه کیفیت آب شیرین با فناوری‌های تقطیری رقابت کند. بنابراین، چنانچه کیفیت آب شیرین در حد زیر ۱۰ ppm برای جامدات محلول در آب مدنظر باشد، استفاده از فناوری الکترودیالیز به استفاده از فناوری اسمز معکوس ارجحیت دارد. همچنین، استفاده از فناوری الکترودیالیز، به دلیل بازده بالای بازیافت (بالاتر از ۹۰ درصد)، برای دستیابی به فناوری "تخلیه صفر مایع به محیط" هزینه کم‌تری به سرمایه‌گذار تحمیل می‌کند. به هر حال استفاده از دو فناوری اسمز معکوس و الکترودیالیز برای آب خروجی از واحد پساب، نسبت به حالتی که از آب دریا به عنوان خوراک استفاده شود، از دیدگاه اقتصادی مقرون به صرفه‌تر است.

در حالت استفاده از آب بازیافت به جای آب دریا، به عنوان خوراک، استفاده از فناوری اسمز معکوس دارای مزایای زیر است:

- کاهش هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه تعمیرات - عملیات
- به ترتیب به میزان ۴۱ و ۴۷ درصد
- افزایش میزان استحصال آب شیرین تا ۲/۶۷ برابر
- افزایش کیفیت آب به میزان ۲/۵ برابر
- تقلیل تعداد ماژول‌های موردنیاز به نصف
- افزایش ارزش فعلی خالص به بیش از ۱۵ میلیون دلار
- افزایش نرخ برگشت سرمایه به بیش از ۴۰ درصد
- کاهش مدت برگشت سرمایه به میزان متوسط ۵/۸ سال
- دستیابی به حداقل نرخ بهره (۲۰ درصد) در ازای کاهش قیمت فروش آب شیرین به میزان ۲/۷۵ دلار در هر متر مکعب

### راهکارهای استفاده مجدد در فرایندها

صرف‌نظر از به خدمت‌گیری فناوری‌های ذکر شده در بخش قبل، استفاده مجدد از آب خروجی از واحد بازیافت به صورت مستقیم، با توجه به قابلیت‌های موجود در سیستم فعلی، مطابق جدول (۲) است.

با توجه به موارد مندرج در ردیف (۱) از جدول (۲)، استفاده از تمهیداتی برای ذخیره‌سازی اولیه آب خروجی از واحد پساب

**جدول ۲: راهکارهای استفاده مجدد از آب بازیافت شده به صورت مستقیم در فرایندها**

ردیف	راهکار استفاده مجدد	ویژگی‌ها و مصارف بارز
۱	ایجاد مخزن ذخیره آب	- استفاده به عنوان آب آتش‌نشانی تحت شرایط اضطراری - افزایش زمان کارکرد فرایندها حین شرایط اضطراری از دست رفتن واحد تأمین آب پالایشگاه
۲	مصارف آبیاری	- جلوگیری از هدررفت آب شیرین برای مصارف آبیاری - توسعه فضای سبز و فعالیت‌های زیست‌محیطی
۳	جریان جبران‌ساز در فرایندها	- امکان استفاده به عنوان جریان جبرانی بویلر - امکان استفاده به عنوان جریان جبرانی در نمک‌زداها - امکان استفاده به عنوان جریان جبرانی در برج خنک‌کننده
۴	مصارف جانبی	استفاده برای شست‌وشوی تجهیزات، محوطه‌ها، تست‌های هیدرواستاتیک، تعمیرات اساسی مخازن

شود. بدیهی است، چنانچه آب خروجی از واحد پساب با فناوری اسمز معکوس شیرین‌سازی شود، آنگاه منبع جایگزین مناسبی برای تأمین آب موردنیاز در نمک‌زدا خواهد بود.

تنها موردی که در ردیف (۳) از جدول (۲) می‌توان از آن به عنوان یکی از منابع بالقوه استفاده مستقیم از آب خروجی واحد بازیافت نام برد، منبع تأمین‌کننده جریان جبران‌ساز برج خنک‌کننده است. با استفاده از جدول (۳) و محاسبات مربوط به طراحی برج خنک‌کننده، در قالب معادلات موازنه جرم و انرژی، مقدار جریان جبران‌ساز قابل محاسبه است. جدول (۴) مقادیر محاسبه‌شده برای جریان‌های ورودی و خروجی یک برج خنک‌کننده نوعی را با جریان گردش آب دریا نشان می‌دهد.

$$W_{\text{(make-up)}} = W_{\text{evaporation}} + W_{\text{(blow down)}} + W_{\text{drift}} \quad (1)$$

$$Q_{\text{Tower}} = W_{\text{circulation}} * C_p * (T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}}) \quad (2)$$

تصفیه آب ترش است. از طرف دیگر، بخش مازاد آب ترش تصفیه‌شده به واحد پساب ارسال می‌شود. بنابراین اگر نیاز باشد که از آب خروجی از واحد پساب در نمک‌زداها استفاده شود، طبق مستندات موجود می‌توان قبل از ارسال آب خروجی از واحد تصفیه آب ترش به واحد پساب مستقیماً از آن استفاده کرد. البته این نکته قابل توجه است که مشخصه COD آب خروجی از واحد پساب، نسبت به آب خروجی از واحد تصفیه آب ترش، ۶ تا ۱۲ برابر کم‌تر است، ولی در مقابل میزان TDS آن ۲۵۰ تا ۴۵۰ برابر بیش‌تر است. بنابراین، مشخصه پایین COD با مشخصه بالای TDS تعدیل می‌شود. از طرف دیگر، به منظور ممانعت از تجمع مواد فنولیک در سامانه نمک‌زداها، باید همواره بخشی از جریان آب ترش تصفیه‌شده با آب تقریباً عاری از آلاینده‌ها (مثلاً آب خروجی از آب‌شیرین‌کن) جایگزین

**جدول ۳: درصد جریان‌های ورودی و خروجی برج خنک‌کننده بر حسب جریان گردش آب دریا [۱۱]**

نوع آب	مشخصه برج	آب دریا	آب لب‌شور (خروجی بازیافت)	آب شیرین
مقدار بخار خروجی	۱/۲ درصد جریان چرخشی	۱/۲ درصد جریان چرخشی	۱/۲ درصد جریان چرخشی	۱/۲ درصد جریان چرخشی
ضریب غلظت	۱/۴	۲/۵	۵	
مقدار جریان جبران‌ساز	۴/۲ درصد جریان چرخشی	۲/۰ درصد جریان چرخشی	۱/۵ درصد جریان چرخشی	
مقدار جریان پساب برج	۳/۰ درصد جریان چرخشی	۰/۸ درصد جریان چرخشی	۰/۳ درصد جریان چرخشی	

#### جدول ۴: جریان‌های ورودی و خروجی برای یک برج خنک‌کننده با جریان گردش آب دریا

مشخصه‌های برج خنک‌کننده	مقادیر محاسبه شده
$W_{\text{blow-down}}$ : جریان پساب برج ( $\text{m}^3/\text{hr}$ )	۳۱۳
$W_{\text{evaporation}}$ : جریان بخار خروجی ( $\text{m}^3/\text{hr}$ )	۱۲۵
$W_{\text{make-up}}$ : جریان جبران‌ساز ( $\text{m}^3/\text{hr}$ )	۴۳۸
$W_{\text{circulation}}$ : جریان چرخشی ( $\text{m}^3/\text{hr}$ )	۱۰۰۰۰
$C_p$ : ظرفیت گرمایی ویژه ( $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$ )	۳/۹۸۶
چگالی ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	۱۰۱۴
$Q$ : گرمای تبدلی ( $\text{MJ}/\text{hr}$ )	۴۹۵
$T_{\text{range}}$ : اختلاف دمایی ایجاد شده ( $^{\circ}\text{C}$ )	۱۲/۲۲

خروجی واحد بازیافت آب، بهترین گزینه برای ارتقای آن از لحاظ کیفیت و شیرین‌سازی، استفاده از فناوری‌های غشایی است.

- در بین فناوری‌های غشایی موجود و متداول در صنعت، استفاده از دو فناوری با نام‌های اسمز معکوس و الکترودیالیز امکان‌پذیر است. روش انتخاب این دو فناوری تابع کیفیت آب خروجی است. چنانچه کیفیت زیر  $200 \text{ ppm}$  از جامدات محلول در آب مدنظر باشد، استفاده از فناوری اسمز معکوس از جذابیت فوق‌العاده‌ای نسبت به الکترودیالیز برخوردار است. چنانچه کیفیت آب خروجی مشابه فرایند تقطیر مدنظر باشد (زیر  $10 \text{ ppm}$ )، استفاده از فناوری الکترودیالیز پیشنهاد می‌شود.

- دستیابی به فناوری تخلیه صفر مایع به محیط زیست، با استفاده از فناوری الکترودیالیز نسبت به اسمز معکوس، با توجه به قابلیت بالای بازیافت، مقرون به صرفه‌تر است.

- در حالت استفاده از فناوری اسمز معکوس با نرخ بهره ۲۰ درصد، قیمت فروش آب شیرین تولیدی از آب پساب با کیفیت  $200 \text{ ppm}$  حدود  $3/25$  دلار به ازای هر متر مکعب است. این در حالی است که استفاده از آب دریا به عنوان خوراک، قیمت فروش آب را تا شش دلار به ازای هر متر مکعب،

$$W_{\text{evaporation}} = Q_{\text{tower}} * f_{\text{latent/hfg}} \quad (3)$$

در معادلات فوق مقدار  $f_{\text{latent}}$  (ضریب تصحیح گرمای نهان تبخیر برای آب شور) برابر  $0/6$  در نظر گرفته شده است. با توجه به موارد محاسبه شده در جدول (۴)، مثلاً با درنظر گرفتن آب خروجی واحد بازیافت، به عنوان نصف مقدار آب جبران‌ساز برج خنک‌کننده، پس از راه‌اندازی برج و با گذشت زمان، در نهایت مقدار کل جامدات محلول در آب برابر با میانگین آن در آب دریا و آب بازیافت خواهد بود؛ که رقمی در حدود  $23000 \text{ ppm}$  است. بر اثر کاهش مقدار جامدات محلول در آب گردش برج خنک‌کننده، ظرفیت گرمایی ویژه به اندازه  $0/2$  افزایش می‌یابد که به تبع آن مقدار آب گردش به میزان ۲ درصد (یعنی ۲۰۰ متر مکعب در ساعت) کاهش می‌یابد. در بهترین حالت، چنانچه کل آب جبران‌ساز با آب خروجی از واحد بازیافت جایگزین شود موارد زیر به عنوان مزیت‌های بالقوه قابل طرح است:

- کاهش آب گردش به میزان ۵۰۰ متر مکعب در ساعت
- کاهش انرژی مصرفی توسط پمپ جریان گردش
- کاهش میزان مواد شیمیایی تثبیت‌کننده و ممانعت‌کننده‌های خوردگی و پایین آمدن هزینه عملیات
- بدین ترتیب گزینه استفاده از آب خروجی از واحد بازیافت در زمینه استفاده مجدد در فرایندهای مربوطه (بدون استفاده از فناوری ارتقا دهنده) تنها به عنوان آب جبرانی در برج خنک‌کننده تحت شرایط خاص استفاده می‌شود.

#### نتیجه‌گیری

- استفاده از فناوری تقطیر در مبحث شیرین‌سازی آب تصفیه شده واحد بازیافت، برای غلظت‌های  $\text{TDS}$  پایین‌تر از  $30000 \text{ ppm}$  صرفه اقتصادی ندارد.
- استفاده از فناوری غشایی، علی‌الخصوص دو فناوری اسمز معکوس و الکترودیالیز، برای آب‌های با شوری کم و متوسط پیشنهاد می‌شود.
- با توجه به خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آب تصفیه شده



برای دستیابی به همان نرخ بهره افزایش می‌دهد. آتش‌نشانی تحت شرایط اضطراری باشد که البته اثرات مفید  
 • گزینه‌های استفاده مجدد برای آب بازیافتی از واحد پساب این راهکارهای مذکور برای مورد دوم مشهودتر است.  
 می‌تواند شامل تأمین آب جبران‌ساز واحد برج خنک‌کننده و آب

### فهرست علائم و اختصارات

TDS: Total Dissolved Solids	SWED: Sea Water Electro Dialysis
PW: Potable Water	IRR: Internal Rate of Return
BRW: Brackish Water	NPV: Net Present Value
SW: Salty or Sea Water	ppm: part per million
BW: Brine Water	COD: Carbon Oxygen Demand
ZLD: Zero Liquid Discharge	W: Mass flow rate (m <sup>3</sup> /hr)
MSF: Multi-Stage Flashing	Q: Transferred heat (MJ/hr)
MED: Multiple Effect Distillation	C <sub>p</sub> : Specific Heat Capacity (kJ/kg.K)
RO: Reverse Osmosis	T: Temperature (K)
ED: Electro-dialysis	h <sub>fg</sub> : Latent heat (KJ/Kg)
SWRO: Sea Water Reverse Osmosis	f <sub>latent</sub> : Modification factor of latent heat for saline water
BWRO: Brackish Water Reverse Osmosis	

### منابع

1. Neil M. Wade, Distillation plant development and cost update, Mott MacDonald Ltd., Brighton, UK, Desalination 136, 2001, pp. 3–12.
2. Wikipedia
3. The Department of Environmental Quality in Wyoming (DEQ) (2005 March) Quality Standards for Wyoming Groundwater, Chapter 8 and Chapter 13. Water Quality Rules and Regulations.
4. The Department of Environmental Quality in Wyoming (DEQ) (2004 September) Underground Injection Control. Available at: <http://deq.state.wy.us/wqd/groundwater/uicprogram/index.asp>. Accessed 2007 February 28.
5. AMEC Earth & Environmental Calgary, Alberta, Cost-Benefit Analysis of Treating Saline Groundwater, Web Site: <http://www.environment.gov.ab.ca>, March 2007.
6. Roberto Borsani, Silvio Rebagliati, Fundamentals and costing of MSF desalination plants and comparison with other technologies, FisialtimpiantiSpA Via De Marini, 16149 Genova, Italy, Desalination 182, 2005, pp. 29-37.
7. American Membrane Technology Association (2005) Membrane Technology Facts. Stuart, Florida. Available at: [http://www.membranes-amta.org/publications\\_facts.html](http://www.membranes-amta.org/publications_facts.html). Accessed 2007 February 28.
8. Tsiourtis NX (2001) Desalination and the Environment. Desalination 141, pp. 223-236.
9. Henthorne L (2005) Economic Evaluation of Membrane and Conventional SWRO Pretreatment – Results from a Pilot Study. American Waterworks Association, Membrane Technology Conference.
۱۰. شرکت پالایش نفت بندرعباس، "مطالعه جامع پساب شرکت پالایش نفت بندرعباس و اثرات بالقوه زیست محیطی بر اکوسیستم داخلی منطقه"، مجری: پژوهشکده اکولوژی خلیج فارس، ۱۳۸۷-۱۳۹۰.
11. Seawater Desalination Costs, White Paper, September 2011; Revised January 2012