

استفاده مجدد از آب تولیدی در میادین نفت و گاز

محمدحسین صراف زاده^{1*}، بیژن رضایی²، علی نخعی³

¹ کرسی یونسکو در بازیافت آب، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

² دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

³ استادیار، انستیتو مهندسی نفت، دانشگاه تهران، تهران، ایران

دریافت: 94/1/17 پذیرش: 95/6/7

چکیده

آب تولیدی در میادین نفت و گاز و چگونگی مدیریت آن از مسائل حائز اهمیت صنعت نفت و گاز می‌باشد. با توجه به سخت‌گیر بودن قوانین و استانداردهای دفع به محیط زیست و حجم بالای آب تولیدی، سالانه هزینه‌های هنگفتی برای تصفیه و دفع این محصول ناخواسته به صنعت تحمیل می‌شود. بر اساس میانگین جهانی، مقدار آب تولیدی در روز حدود سه برابر نفت تولیدی است. امروزه با توجه به کمبود آب و رشد صنعت که مصرف بیش‌تر آب را به همراه دارد، محققین به دنبال یافتن منابع جدید آبی هستند. تحقیقات اخیر نشان داده است که آب تولیدی تصفیه شده، پتانسیل استفاده در صنایع مختلف را دارا می‌باشد. در نتیجه می‌توان از مصرف آب تمیز و با کیفیت در مصارفی که غالباً به کیفیت بالایی نیاز ندارند جلوگیری کرد. در این مقاله، تصفیه آب تولیدی و گزینه‌های بازیافت و استفاده از آن بررسی شده است.

کلمات کلیدی: آب تولیدی، بازیافت آب، تصفیه آب، مدیریت مخازن، فرایندهای غشایی

مقدمه

نفت و گاز در حال حاضر مهم‌ترین منابع انرژی در جهان می‌باشند. در حین برداشت نفت و گاز مقدار قابل توجهی آب به عنوان محصول جانبی تولید می‌شود که به آن آب تولیدی¹ اطلاق می‌شود. حجم این آب بسیار زیاد است به طوری که به ازای تولید روزانه 80 میلیون بشکه نفت در جهان مقدار آب تولیدی 250 میلیون بشکه معادل حدود 40 میلیون متر مکعب در نظر گرفته می‌شود. در واقع میانگین نسبت تولید آب به نفت در جهان سه به یک می‌باشد که البته این نسبت در کشورهای مختلف یکسان نیست و به عوامل متعددی بستگی دارد به عنوان مثال با افزایش عمر چاه این مقدار افزایش می‌یابد [1]. همچنین باید توجه

*sarrafdzh@ut.ac.ir

¹ Produced water

کرد که در میادین نفت و گاز با در نظر گرفتن چاه‌های گاز، نسبت آب تولیدی فرق خواهد کرد. آب تولیدی علاوه بر هیدروکربن‌ها، آلودگی‌هایی دارد که هرکدام از آن‌ها دارای اثرات شیمیایی و مخرب زیست‌محیطی می‌باشند. با توجه به نفت‌خیز بودن ایران، مدیریت آب همراه نفت و گاز از اهمیت زیادی برخوردار است. با توجه به شدت آلودگی آب تولیدی، قوانین زیست محیطی اجازه دفع آب تولیدی بدون تصفیه را نمی‌دهد. هر چند در کشور ما علی‌رغم وجود قوانین بازدارنده زیست‌محیطی متاسفانه رهاسازی آب تولیدی در برخی موارد خسارات متعددی را به محیط زیست وارد نموده است و چالش‌ها و مخاطراتی را موجب شده است. از نظر اقتصادی و فرایندی، در بسیاری از موارد بهتر است این آب پس از تصفیه در راستای استفاده مجدد از آب در بخش‌های مختلف بالادستی صنعت نفت مورد توجه قرار گیرد. از طرفی میزان آب تولیدی، مقدار قابل توجهی می‌باشد و دفع آن به معنی از دست دادن یک منبع با ارزش آب است. این آب در صورت مدیریت صحیح و استفاده در مواردی مثل کشاورزی، دامپروری و صنعت نفت، نه تنها دیگر یک مشکل نیست بلکه یک منبع ارزشمند می‌باشد. این مقاله نیز دقیقاً در راستای تبیین این موضوع نگاشته شده است که در شرایط کنونی بحران آبی کشور، چگونه منابع نامتعارف آب می‌توانند چاره‌ساز شوند و چالشی همچون آب تولیدی را تبدیل به فرصتی برای تامین آب نمایند.

خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آب تولیدی

آب تولیدی ترکیبی از مواد آلی و معدنی است. عواملی از قبیل مکان جغرافیایی میدان، ساختار زمین‌شناسی، عمر مخزن و نوع هیدروکربن تولیدی، تعیین‌کننده‌ی خواص فیزیکی و شیمیایی آب هستند. مواد موجود در آب تولیدی، مشابه نفت یا گاز مجاورش در مخزن می‌باشد و مقدار این مواد در چاه‌های مختلف می‌تواند به مقدار زیادی تغییر کند.

اجزای آب تولیدی شامل ترکیبات نفتی محلول و پراکنده (گروه BTEX، مواد آروماتیکی، فنول‌ها، الکیل فنول‌ها، مواد قطبی آلی و ...)، مواد معدنی محلول، مواد رادیواکتیو (غالباً رادیوم 226 و 228)، مواد شیمیایی استفاده شده در فرایند تولید (بیوسایدها، بازدارنده‌های خوردگی، آنتی فوم‌ها و ...)، فلزات سنگین، مواد جامد (محصولات خوردگی، رسوبات، باکتری‌ها، وکس و آسفالتن) و گازهای حل شده (غالباً دی‌اکسید کربن، هیدروژن سولفید و اکسیژن) اشاره نمود. در جدول 1، مقادیر برخی پارامترها برای یکی از میادین ایران و مقادیر معمول آورده شده است.

به دلیل وجود مواد شیمیایی سمی در آب تولیدی، میکروارگانیسم‌های کمی توان ادامه بقا دارند. آنالیز بیولوژیکی نشان دهنده‌ی وجود 50 تا 100 سلول به ازای یک میلی لیتر آب تولیدی است که غالباً باکتری‌های گرم مثبت و هوازی هستند [1].

راهکارهای مورد استفاده در مدیریت آب تولیدی

مدیریت آب تولیدی می‌تواند از طرق مختلفی صورت گیرد که شرح کامل تمام آن‌ها در این مقاله نمی‌گنجد، اما سعی می‌شود در زیر به صورت مختصر معرفی و مورد مرور قرار گیرند:

جدول 1. برخی از پارامترهای مهم آب تولیدی (مقادیر معمول میادین نفتی جهان در مقایسه با یکی از میادین ایران) [2و1]

پارامتر	بازه‌ی معمول میادین نفتی	پارامتر	مقادیر سازند آسماری (ایران)	بازه‌ی معمول میادین نفتی جهان
¹ TOC(mg/l)	0 - 1500	pH	5/3	4/3-10
² COD(mg/l)	1220	(mg/l) سدیم	15200	132-97000
³ TSS (mg/l)	1/2 - 1000	(mg/l) پتاسیم	985	24-4300
(mg/l) فنول‌ها	0/009 - 23	(mg/l) کلسیم	29300	13-25800
(BTEX;mg/l) مواد فرار	0/39 - 35	(mg/l) منیزیم	6300	8 - 6000
(mg/l) نیتروژن آمونیاکی	10 - 300	(mg/l) سولفات	694	<2 - 1650
(mg/l) کل مواد قطبی	9/7 - 600	(mg/l) بی‌کربنات	90	77 - 3990
(mg/l) نفت کل	2 - 565	TDS (mg/l)	171000	-

1- کاهش میزان آب تولیدی

کاهش آب تولیدی از دو روش ممانعت از ورود آب از مخزن به چاه (با استفاده از وسایل سد کننده‌ی مکانیکی و شیمیایی) و جلوگیری از رسیدن آب به سطح زمین (روش‌هایی مثل water shut-off) صورت می‌گیرد. به عنوان مثال در روشی مثل water shut-off به کمک مواد شیمیایی، مواد پلیمری خاصی به مخزن تزریق می‌گردد که ویسکوزیته آب همراه را تغییر داده و با تشکیل یک ماده ژل مانند، جریان یافتن آب را محدود می‌نماید [3].

2- تخلیه به محیط زیست

آب تولیدی در صورت داشتن استانداردهای لازم ممکن است به محیط‌زیست تخلیه شود. در چاه‌های نفتی مستقر در دریا، غالب آب تولیدی پس از تصفیه به دریا تخلیه می‌شود. در چاه‌های مستقر در خشکی، مشکل کمبود فضای سکویهای نفتی مطرح نیست و از روش‌های تخلیه غیر مستقیم مثل حوضچه‌های تبخیر می‌توان بهره برد [4].

3- بازیافت و استفاده مجدد

با توجه به نیاز روز افزون به آب و کمبود آن در نواحی خشک، در نظر گرفتن آب تولیدی به عنوان یک منبع نامتعارف تامین آب بسیار توجیه‌پذیر است. در مصارف بسیاری می‌توان از آب تولیدی استفاده کرد. البته کیفیت آب مورد نیاز در مصارف مختلف می‌تواند متفاوت باشد. در برخی موارد ممکن است آب تولیدی را مستقیماً استفاده نمود و گاهی نیاز به آب با کیفیت بالا نیست اما یک عملیات پیش تصفیه

¹ Total organic compounds

² Chemical oxygen demand

³ Total suspended solids

فیزیکی روی آب تولیدی ضروری است. در مواردی نیز آب تولیدی باید کاملاً تصفیه گردد تا به استانداردهای لازم برسد و قابل استفاده باشد [4]. برخی از موارد کاربرد آب تولیدی عبارتند از:

- تزریق به مخزن برای افزایش برداشت نفت: تزریق به مخزن، رایج‌ترین روش مدیریت آب تولیدی در خشکی می‌باشد. گاهی این تزریق فقط برای دفع صورت می‌گیرد، اما غالباً این امر برای بقای فشار مخزن و راندن نفت به سمت چاه صورت می‌گیرد. از آنجایی که جامدات موجود در آب تولیدی و بیوفیلیم حاصل از فعالیت میکروارگانیسم‌ها می‌تواند باعث گرفتگی و کاهش تزریق‌پذیری چاه‌های تزریق مجدد شود، آب تولیدی برای تزریق مجدد نیز باید تا حدودی تصفیه شود. همچنین این آب باید با مخزن سازگار باشد تا با ترکیبات درون آن ایجاد رسوب نکند. برای جلوگیری از این مشکل معمولاً از آب تولیدی خود مخزن برای تزریق استفاده می‌کنند [3 و 4]. این روش در آمریکا اجرا شده است و مقادیر عظیم آب تولیدی به مخازن تزریق گردیده است. به عنوان مثال در سال 2003، 900 میلیون بشکه آب تولیدی به چاه‌های کالیفرنیا برای افزایش برداشت تزریق شد. استفاده از این راهکار در نیومکزیکو و تگزاس نیز گزارش شده است [4].
- تأمین آب آشامیدنی: طبق پژوهش‌های مختلف، آب تولیدی پتانسیل تبدیل به آب آشامیدنی را دارا می‌باشد ولی با توجه به سطح تصفیه‌ای که برای این کاربرد نیاز است، بهتر است آخرین گزینه باشد [5]. استفاده از آب تولیدی به عنوان آب شرب به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم صورت می‌گیرد. در روش غیر مستقیم آب تولیدی تصفیه شده به منابع متعارف آب تزریق می‌شود. با این روش از تصفیه طبیعی توسط محیط زیست نیز بهره گرفته می‌شود. به طور مثال با تزریق به ناحیه بالای سفره‌های زیرزمینی که ناحیه هواده¹ نامیده می‌شوند می‌توان از فیلتراسیون خاک بهره برد. از مشکلات اصلی استفاده از آب تولیدی برای شرب، اثرات سمی نامعلوم و عدم پذیرش عموم می‌باشد [6]. با توجه به این موارد، استفاده از این راهکار در آینده‌ای نزدیک ممکن نیست. اجرای عملی این راهکار تاکنون (علی‌رغم پژوهش‌های موفق صورت گرفته) تأییدی بر این امر است.
- تزریق برای استفاده در آینده: گاهی آب تولیدی دارای کیفیت خوبی است و می‌تواند با تصفیه کم یا بدون تصفیه استفاده شود. آب تولیدی از مخازن گاز لایه زغال سنگ از این نوع هستند. در صورت عدم داشتن برنامه‌ای برای استفاده، این آب را می‌توان برای مصرف در آینده به سفره‌های زیرزمینی تزریق کرد [4]. براساس² در سال 2002، گزارشی از تصفیه و تزریق مخلوطی از آب تولیدی و آب زیرزمینی در کالیفرنیا برای استفاده در آینده و آبیاری ارائه داده است [7].
- استفاده در دامداری‌ها و استخرهای پرورش ماهی: حیوانات اهلی محدوده‌ای از آلودگی را می‌توانند تحمل کنند. آب تولیدی برای استفاده حیوانات به اندازه کافی تمیز است یا نیاز کمی به تصفیه دارد. در وایومینگ آمریکا از آب تولیدی برای این امر استفاده شده است [4]. کیفیت مورد نیاز برای

¹Vadose zone

²Brost

پرورش حیوانات اهلی، توسط مراجع مختلف اعلام شده است [8 و 9]. استفاده از آب تولیدی برای آب دادن به حیوانات اهلی در هفت مزرعه در وایومینگ آمریکا گزارش شده است [4]. همچنین جکسون و مایرز¹ در سال 2002 در آزمایشی نشان دادند که از آب تولیدی برای پرورش ماهی می‌توان استفاده کرد [10].

- استفاده برای آبیاری: پارامترهای اساسی در تعیین کیفیت آب آبیاری شامل شوری، مقدار سدیم و سمیت می‌باشد. میزان تحمل شوری برای گیاهان متفاوت است و در صورت بیش‌تر بودن از مقداری خاص، بازده پرورش گیاه کاهش می‌یابد. آب با مقادیر بالای سدیم به خاک آسیب می‌زند. ذرات خاک سدیمی در صورت خیس بودن به هم می‌چسبند و در صورت خشک بودن توده‌ای غیرقابل نفوذ ایجاد می‌کند. از طرف دیگر برخی مواد در صورت حضور به مقدار کافی در آب می‌توانند برای گیاه سمی باشند [4]. آب تولیدی تصفیه شده می‌تواند جوابگوی استاندارد و حدود مجازی که توسط سازمان غذا و کشاورزی ملل متحد در خصوص کیفیت آب لازم برای آبیاری تدوین شده است، باشد [9]. همان‌طور که گفته شد استفاده از آب تولیدی برای آبیاری توسط براس ت گزارش شده است [7]. همچنین در وایومینگ آمریکا این روش نیز به کار گرفته شده است [4].
- استفاده‌های صنعتی و شهری: در نواحی دچار کمبود آب سطحی و زیرزمینی، آب تولیدی در صورت داشتن کیفیت مناسب می‌تواند جایگزین مناسبی در برخی نیازهای صنعت به خصوص صنعت نفت باشد. به عنوان مثال می‌توان به کنترل گرد و خاک در میداین نفتی، شستشوی وسایل نقلیه و تجهیزات، استفاده در جداسازی هیدروژن سولفید، استفاده در حفاری، استفاده در نیروگاه بخار و اطفاء حریق اشاره کرد. هرکدام از موارد مذکور سابقه استفاده در میداین نفتی مختلف را دارند [4]. همچنین در مناطق شهری، آب مورد نیاز برای آتش‌نشانی، آبیاری پارک‌ها و زمین‌های ورزشی و مصارف بهداشتی (مثل سیفون دستشویی) از طریق آب تولیدی قابل تأمین است [11]. در برنامه‌ای در نیومکزیکو، آب تولیدی پس از تصفیه برای حفاری استفاده می‌گردد. این برنامه موجب جلوگیری از مصرف سالانه بیش از 40 میلیون بشکه آب زیرزمینی شده است [12].

تصفیه آب تولیدی

اصولا تصفیه پساب شامل سه مرحله اصلی (به غیر از پیش تصفیه) می‌باشد که در مورد آب تولیدی معمولا نمک‌زدایی نیز یک مرحله جدا در نظر گرفته شده است. در پیش تصفیه، توده‌های آزاد نفت، حباب‌های گاز و ذرات درشت جدا می‌شوند. تانک‌های ذخیره نفت جدا شده، آشغال‌گیرها و شن‌گیر از تجهیزات این مرحله هستند. در ادامه تصفیه اولیه انجام می‌شود و قطرات کوچک هیدروکربن و ذرات کوچک در آب حذف می‌شوند. بعد از تصفیه اولیه میزان هیدروکربن پراکنده به زیر مقدار معمول تخلیه در دریا (40 mg/lit) می‌رسد. تجهیزاتی از جمله جداساز API، هیدروسیکلون، شناور سازی با گاز و سانتریفیوژ در تصفیه اولیه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در صورتی که استفاده مجدد از آب تولیدی مدنظر باشد یا قوانین محیط زیستی

¹Jackson and Myers

ایجاب کنند نیاز به تصفیه‌ی بیشتر می‌باشد. مرحله بعدی، تصفیه ثانویه یا بیولوژیکی است که در آن از میکروارگانیسم‌ها برای حذف مواد آلی محلول استفاده می‌شود. حوضچه‌های لجن فعال و بیوراکتورها از فرایندهای مورد استفاده در این بخش هستند. در نهایت اگر کیفیت بالایی برای آب تصفیه شده مورد نظر باشد، مرحله دیگری با عنوان تصفیه ثالث اضافه می‌گردد که مواد مقاوم در فرایند را که در عملیات تصفیه اولیه و ثانویه حذف نشده‌اند، با روش‌های ترکیبی فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی حذف می‌کند. فرایندهایی از قبیل کلرزنی و جذب با کربن فعال در این مرحله کاربرد دارند. مرحله نمک زدایی معمولاً مرحله مهمی برای تکمیل تصفیه آب تولیدی و رسیدن به استانداردهای آبیاری و کشاورزی می‌باشد. الکترودیالیز، اسمز معکوس، نانو فیلتراسیون و دیگر تکنولوژی‌های غشایی برای تأمین کیفیت لازم مورد استفاده قرار می‌گیرند [11 و 6].

در تعداد زیادی از پژوهش‌های ارائه شده در مورد استفاده مجدد از آب تولیدی، فرایند اسمز معکوس برای نمک‌زدایی پیشنهاد گردیده است [5 و 13]. استفاده از فرایندهای ترکیبی برای تصفیه آب تولیدی نیز در پژوهش‌ها به چشم می‌خورد. از جمله این فرایندها می‌توان به بیوراکتورهای غشایی اشاره کرد که فرایند غشایی نمک زدایی و بیولوژیکی را ادغام کرده است [14]. ایگونو و چن¹ خلاصه‌ای از فرایندهای معمول برای تصفیه آب تولیدی، مزایا و معایب و هزینه‌ی آن‌ها ارائه داده‌اند [15].

بدیهی است که وقتی مشکل اصلی استفاده از آب تولیدی شوری آن باشد، برای حل آن می‌توان از تجارب و دانشی که در فرایندهای شیرین سازی آب دریا وجود دارد بهره برد. در جدول 2 مزایا و معایب فرایندهای متداول نمک‌زدایی که در تصفیه آب تولیدی نیز می‌توانند به کار گرفته شوند به صورت خلاصه آمده است. البته فرایند انجماد-ذوب-تبخیر با توجه به بازیافت کم آب، اشغال مساحت زیاد و از همه مهم‌تر عدم سازگاری با اقلیم چاه‌های ایران در جدول آورده نشده است [15]. همچنین فرایند نانوفیلتراسیون و تبادل یونی با توجه به این‌که اصولاً قدرت کمی در حذف نمک کلرید سدیم دارند در جدول مطرح نشده‌اند [15 و 16]. از میان فرایندهای نمک‌زدایی، همان‌گونه که ذکر شد فرایند اسمز معکوس بیش‌تر مورد پژوهش قرار گرفته است و به همین خاطر بخش بعد به پتانسیل و محدودیت‌های این روش در تصفیه آب تولیدی اختصاص یافته است. اما واقعیت این است که این روش به عنوان یک تصفیه تکمیلی و همراه با تصفیه ثالث در شرایط نیاز به آب با کیفیت بالا به کار گرفته می‌شود و اصولاً انتخاب روش به فاکتورهای متعددی بستگی دارد که برخی از آن‌ها در این مقاله مورد اشاره قرار گرفته است.

اسمز معکوس

فرایند اسمز معکوس از فشار هیدرولیکی برای غلبه بر فشار اسمزی و عبور آب خالص از غشا استفاده می‌کند. انرژی لازم برای غلبه بر فشار اسمزی متناسب با میزان نمکی است که باید حذف گردد. میزان بازیافت آب بستگی به ترکیب آب ورودی و طراحی و اندازه سیستمی تواند بسیار متغیر باشد [19]. این فرایند که قادر است ذرات با اندازه‌ی بیش از 0/0001 میکرومتر را جدا کند، توانایی تأمین کیفیت آب شرب

¹Igunnu&Chen

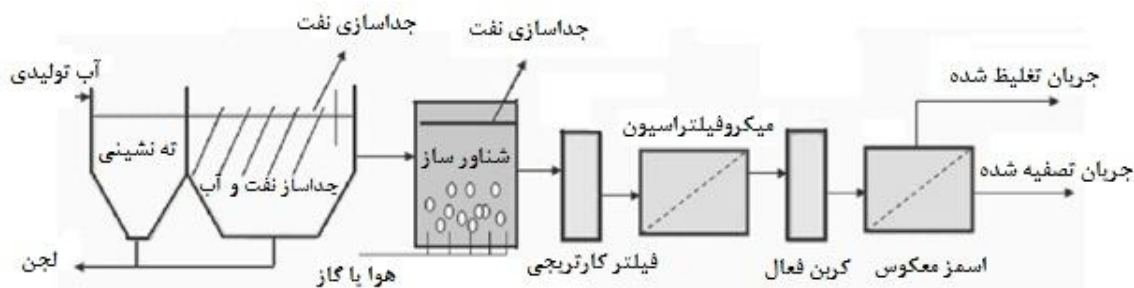
را دارا می‌باشد. با توجه به این‌که در سامانه‌های تجاری اسمز معکوس، فرایند به صورت جریان مماسی صورت می‌گیرد، علاوه بر آب تصفیه شده، پسایی از سیستم خارج می‌شود که شوری آن بسیار بالاتر از ورودی به سیستم است.

جدول 2. مقایسه فرایندهای متداول نمک‌زدایی و مزایا و معایب هر یک از آنها [15, 16, 17 و 18]

مزایا	معایب	تکنولوژی
1- پیش‌تصفیه ساده‌تری در مقایسه با تکنولوژی‌های غشایی نیاز دارد. 2- برای خوراک با کیفیت متغیر مناسب است.	1- خوردگی و رسوب بالا 2- بازیافت کم آب (کمتر از 20 درصد) 3- استفاده برای $TDS > 40000 \text{mg/l}$ امکان‌پذیر نیست. 4- مصرف انرژی بالا نسبت به فرایندهای غشایی	تقطیر سریع چند مرحله‌ای (MSF)
1- پیش‌تصفیه ساده‌تری در مقایسه با تکنولوژی‌های غشایی نیاز دارد. 2- مناسب برای TDS بالا 3- برای خوراک با کیفیت متغیر مناسب است.	1- خوردگی و رسوب بالا 2- به کارگر ماهر نیاز دارد. 3- مصرف انرژی بالا نسبت به فرایندهای غشایی	تقطیر با اثر چندگانه (MED)
1- برای $TDS > 40000 \text{mg/l}$ مناسب است. 2- نسبت به MSF و MED جای کم‌تری را اشغال می‌کند. 3- پیش‌تصفیه ساده‌تری در مقایسه با تکنولوژی‌های غشایی نیاز دارد.	1- خوردگی و رسوب بالا 2- نیاز به کارگر ماهر 3- مصرف انرژی بالا نسبت به فرایندهای غشایی	تقطیر بخار متراکم (VCD)
1- خوردگی و مصرف انرژی کمتر نسبت به دیگر فرایندهای حرارتی 2- امکان تصفیه آب تا TDS برابر با 300000mg/l	1- هنوز به طور کامل توسعه نیافته است. 2- نیاز به پیش‌تصفیه و پس‌تصفیه دارد.	تقطیر غشایی (MD)
1- سیستم می‌تواند خودکار عمل کند و از نیاز به کارگر بکاهد. 2- عملکرد مناسبی در تصفیه آب تولیدی دارد و استفاده از آن به این منظور متداول است.	1- به مواد آلی و غیرآلی خوراک حساس است. 2- استفاده برای $TDS > 40000 \text{mg/l}$ امکان‌پذیر نیست.	اسمز معکوس
1- گرفتگی کمتر نسبت به دیگر فرایندهای غشایی 2- مصرف انرژی کمتر نسبت به فرایندهای حرارتی 3- امکان استفاده برای TDS های بالا وجود دارد.	1- جریان خروجی از غشا نیازمند یک مرحله جداسازی ثانویه برای جدا کردن محلول کشنده از آب است.	اسمز مستقیم
1- تا حدودی تحمل شرایط سخت را دارد.	1- استفاده برای $TDS > 4000 \text{mg/l}$ اقتصادی نیست. 2- نیاز متناوب به نگهداری و تمیز کردن شیمیایی 3- نیاز به کارگر ماهر	الکترودیالیز و الکترودیالیز معکوس

این پساب باید به خوبی مدیریت شود و گرنه خود منشا مشکلات زیست محیطی دیگری خواهد بود. در صورت ورود پساب خروجی از این فرایند به مخازن آب زیرزمینی، شیمی آب مخزن و نسبت کلسیم به

سدیم باید کنترل شود. همچنین در صورت استفاده شرب از آب تصفیه شده نیاز است املاح معدنی باقیمانده مورد بررسی قرار گیرند. گرفتگی و رسوب از مشکلات اصلی این فرایند می‌باشند که وجود پیش تصفیه مناسب را الزامی می‌کند [6، 11 و 15]. یک واحد پیشنهادی برای تصفیه آب تولیدی با کمک فرایند اسمز معکوس در شکل 1 آمده است [20]. البته میزان پیش تصفیه برای اسمز معکوس باید متناسب با مشخصات آب ورودی و کیفیت خروجی مورد نیاز انتخاب شود و واحد نشان داده شده، با در نظر گرفتن فرضیاتی در این مورد طراحی شده است.



شکل 1. واحد تصفیه آب تولیدی با کمک فرایند اسمز معکوس [20]

فرایند تصفیه مناسب میادین نفتی/گازی ایران

فرایند اسمز معکوس که در بالا پیشنهاد شد برای تصفیه آب تولیدی سازندهایی مثل بنگستان که TDS برابر با 26000 میلی‌گرم بر لیتر دارد، مناسب می‌باشد. اما با توجه به TDS بالای آب تولیدی برخی چاه‌ها مثل آسماری و محدودیت اسمز معکوس برای TDS های بالاتر از 45000 میلی‌گرم بر لیتر، نیاز به پیشنهاد فرایند دیگری برای ایران احساس می‌شود [2 و 16]. فرایندهای حرارتی مثل تقطیر بخار متراکم برای این امر مناسب می‌باشند. اما مصرف انرژی بالا از محبوبیت این فرایندها کاسته است. البته باید توجه نمود که در بسیاری از تاسیسات نفتی و نیروگاه های گازی مقادیر معتدله‌ی انرژی‌های اتلافی وجود دارد که یا در دودکش‌ها سوزانده می‌شوند و یا با درجه حرارت بالا خارج می‌شوند. حوالی هر چاهی که این‌گونه انرژی‌های حرارتی بدون استفاده وجود دارد، روش‌های حرارتی تصفیه آب تولیدی بسیار توجیه‌پذیر می‌شوند. فرایند تقطیر غشایی نیز از فرایندهای آتیه‌دار در نمک‌زدایی می‌باشد که از ترکیب فرایندهای حرارتی و غشایی بهره برده است. این فرایند مصرف انرژی بهینه‌تری نسبت به فرایندهای حرارتی دارد و از قدرت بالای فرایندهای حرارتی در تصفیه آب‌های با شوری بالا بهره می‌برد. نیرومحرکه این فرایند، اختلاف فشار بخار می‌باشد و فقط بخار آب از غشا می‌گذرد. این باعث تولید آب با کیفیت بالا و تاثیر کم غلظت خوراک بر فرایند می‌باشد. مشکل این فرایند، نو بودن و عدم توسعه کامل آن می‌باشد [16 و 21].

اسمز مستقیم دیگر فرایندی است که برای تصفیه آب با شوری بالا مناسب می‌باشد. هزینه سرمایه‌گذاری اولیه¹ و میزان مصرف انرژی این فرایند پایین می‌باشد [22] و با توجه به کار در فشار پایین، مشکل گرفتگی

¹Capital Cost

کمتری نسبت به اسمز معکوس دارد. در این تکنولوژی بر خلاف اسمز معکوس نیازی به اعمال فشار هیدرولیکی نیست و اختلاف فشار اسمزی نیروی محرکه می‌باشد. در سمت تراوش کرده¹ غشا، از یک حلال کشنده² با فشار اسمزی بالا استفاده می‌شود. فشار اسمزی بالای حلال موجب حرکت آب به سمت دیگر غشا می‌شود. البته این حلال باید به گونه‌ای انتخاب شود که با مصرف انرژی کمی از آب جدا شود. در حال حاضر کامل‌ترین حلال برای این امر آمونیاک-کربن‌دی‌اکسید می‌باشد، اگرچه پژوهش‌های زیادی برای توسعه حلال‌های کامل‌تر در جریان است. در پژوهش‌های صورت گرفته، توان بالای آمونیاک-کربن‌دی‌اکسید در نمک‌زدایی از آب‌های با شوری خیلی بالا نشان داده شده است. مزیت اسمز مستقیم در عدم محدودیت غلظت خوراک می‌باشد، زیرا فشار اسمزی محلول کشنده تعیین کننده محدودیت غلظت خوراک می‌باشد [17].

اخیرا پایلوت موفق برای شیرین‌سازی آب تولیدی چاه‌های گاز با شوری بالا توسط اسمز مستقیم و اسمز معکوس پس از آن ساخته شده است [23]. البته فرایند اسمز معکوس جهت اطمینان از رسیدن TDS آب به زیر 500 میلی‌گرم بر لیتر تعبیه شده و در صورت عدم نیاز به این کیفیت می‌توان از اسمز مستقیم به تنهایی استفاده کرد. همچنین شرکت اسیس تکنولوژی مبتنی بر اسمز مستقیم ارائه داده است که می‌تواند آبی که پنج برابر شورتر از آب دریا می‌باشد را به کیفیت آب شیرین برساند [24].

نتیجه‌گیری

در حال حاضر بیش‌تر آب تولیدی در ایران به محیط زیست دفع می‌شود و منشا آلودگی بسیاری از مناطق همجوار چاه‌های برداشت نفت شده است. گرچه نسبت آب تولیدی به نفت در ایران بر اساس گزارش‌های محدود شرکت ملی نفت به صورت عجیبی بسیار کم‌تر از میانگین جهانی آن است اما با توجه به بالا بودن میزان تولید نفت در ایران، مقدار آب تولیدی مخازن ایران در نهایت بسیار قابل توجه می‌باشد. البته به طور کلی علی‌رغم کم‌تر بودن میزان آب تولیدی در مخازن غنی خاورمیانه - از جمله ایران - نسبت به میانگین جهانی، هزینه‌های زیست محیطی و مالی دفع آب تولیدی، به ویژه در مخازن دریایی، بسیار زیاد است. در سال 1393، به ازای 4/2 میلیون بشکه نفت، 450 هزار بشکه آب تولید شده که بخش عمده آن بدون تصفیه کامل وارد محیط زیست شده است. لازم به ذکر است با توجه به افزایش تولید نفت و همچنین بالا رفتن عمر مخازن ایران، این میزان به سرعت در حال افزایش است [24]. با توجه به کمبود آب و امکان استفاده از آب تولیدی در صنایع مختلف که نیازی به آب با کیفیت بالا ندارند، بازیافت و استفاده صحیح از این آب روش مناسبی برای مدیریت این محصول جانبی می‌باشد. از طرفی با این کار از اتلاف آب تمیز و با کیفیت در مکان‌هایی که نیاز به این کیفیت نیست جلوگیری می‌شود. در شرایطی که به دلیل وضعیت بحرانی منابع آب صحبت از شیرین‌سازی آب دریا و انتقال به داخل کشور است، آب تولیدی پتانسیل بالایی دارد که جهت تأمین در درجه اول نیاز خود صنعت نفت مورد استفاده قرار گیرد و سپس نیاز سایر مصارف مناطق

¹Permeate

²Draw Solution

نزدیک به چاه‌های نفت، اعم از کشاورزی و شهری را تا حدودی مرتفع نماید. برای کاهش هزینه حمل و نقل، بهتر است مکان استفاده از آب نزدیک چاه باشد. همچنین استفاده از آب تولیدی در مناطق خشک لزوم بیش‌تری دارد. در نتیجه مکان جغرافیایی تا حدود زیادی تعیین‌کننده نوع استفاده از آب تولیدی و امکان اقتصادی تصفیه و بازیافت می‌باشد. کیفیت آب و فاصله تا استانداردهای موجود برای هر کاربرد نیز نقش زیادی در انتخاب نوع استفاده دارد. با توجه به مقداری که برای میزان آب تولیدی در ایران برآورد شده است، برای کاهش هزینه‌های انتقال بهتر است تا جایی که امکان دارد در مکان تولید یا نزدیکی آن مصرف شود. استفاده از آب تولیدی در سیلاب‌زنی و حفاری در میدان نفتی یا گازی، با توجه به حذف هزینه انتقال راهکارهای مناسبی هستند. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد سازگاری آب تولیدی با مخزن از دیگر مزایای استفاده از این آب برای سیلاب‌زنی می‌باشد.

منابع

1. Fakhru'l-Razi, A., Pendashteh, A.R., Luqman Chuah, A., Dayang Radiah, A.B., Madaeni, S. S., & Zurina, Z.A., Review of technologies for oil and gas produced water treatment, Journal of Hazardous Materials, Vol. 170, pp. 530-551, 2009.
2. زهرا عباسی مزار، بررسی کمی و کیفی آب‌های تولید شده‌ی همراه نفت و آزمایش‌های مربوط به تصفیه‌پذیری آن برای کاربری‌های مختلف، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، 1383.
3. فرید امرایی، پریسا فتایی و امین امرایی، مدیریت آب همراه تولیدی از مخازن نفت و گاز و راهکارهای جهت کاهش آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از آن، دومین کنفرانس برنامه ریزی و مدیریت محیط‌زیست، دانشگاه تهران، 1391.
4. Veil, J.A., Puder, M.G, Elcock, D., and Redweik, R.J. Jr, A White Paper Describing Produced Water from Production of Crude Oil, Natural Gas, and Coal Bed Methane, Prepared for the U.S. Department of Energy, Energy Technology Laboratory, 2004.
5. Xu, Pei, Jörg E. Drewes, and Dean Heil., Beneficial use of co-produced water through membrane treatment: technical-economic assessment, Desalination, Vol. 225, pp. 139-155, 2008.
6. Challenges in Reusing Produced Water, SPE white paper, available at: <http://www.spe.org/industry/docs/reusingwater.pdf>
7. Brost, D. F., Water quality monitoring at the kern river field, In ground water protection council produced water conference, Colorado Springs, CO, Oct, vol. 16, p. 17. 2002.
8. ALL, Handbook on Coal Bed Methane Produced Water, Management and Beneficial Use Alternatives, prepared by ALL Consulting for the Ground Water Protection Research Foundation, U.S. Department of Energy, and U.S. Bureau of Land Management, 2003.
9. Ayers, R.S., Westcot, D.W., Water quality for agriculture, FAO Irrigation and Drinkage paper, 1994. available at <http://www.fao.org/docrep/003/t0234e/t0234e00.htm>
10. Jackson, L., Myers J., Alternative use of produced water in aquaculture and hydroponic systems at Naval Petroleum Reserve No. 3, In Ground Water Protection Council Produced Water Conference, Colorado Springs, CO, Oct, pp. 16-17. 2002.
11. Myers, James E., Chevron San Ardo Facility Unit (SAFU) Beneficial Produced water Reuse for Irrigation, SPE International Conference on Health, Safety and Environment, Long Beach, California, USA, 2014.



12. Peacock, P., Beneficial use of produced water in the Indian Basin Field: Eddy County, NM, In Ground Water Protection Council Produced Water Conference, Colorado Springs, CO, Oct, pp. 16-17. 2002.
13. Melo, M., et al., Advanced performance evaluation of a reverse osmosis treatment for oilfield produced water aiming reuse, Desalination, Vol. 250, pp. 1016–1018, 2010.
14. Soltani, S., Mowla, D., Vossoughi, M. and Hesampour, M., Experimental investigation of oily water treatment by membrane bioreactor, Desalination, Vol. 250, pp. 598-600, 2010.
15. Igunnu, E. T. and Chen, G. Z., Produced water treatment technologies, International Journal of Low-Carbon Technologies, cts049, pp. 1-21, 2012.
16. Younos, T., Tulou. K.E., Overview of desalination techniques, Journal of Contemporary Water Research & Education 132, no. 1, pp. 3-10, 2005.
17. Shaffer, D.L., Arias Chavez, L.H., Ben-Sasson, M., Romero-Vargas Castrillón, S., Yip, N.Y., and Elimelech M., Desalination and reuse of high-salinity shale gas produced water: drivers, technologies, and future directions, Environmental science & technology 47, no. 17 pp. 9569-9583, 2013.
18. Chung, T., Li, X., Ong R.Ch., Ge, Q., Wang, H., and Han G., Emerging forward osmosis (FO) technologies and challenges ahead for clean water and clean energy applications, Current Opinion in Chemical Engineering 1, no. 3, pp. 246-257, 2012.
19. Doran, Glenn F., Frank H. Carini, Darrell A. Fruth, Joseph A. Drago, and Lawrence YC Leong, Evaluation of technologies to treat oil field produced water to drinking water or reuse quality, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 1997.
20. Çakmakce, Mehmet, Necati Kayaalp, and Ismail Koyuncu, Desalination of produced water from oil production fields by membrane processes, Desalination, Vol. 222, pp. 176-186, 2008.
21. Safavi, M., and Mohammadi T., High-salinity water desalination using VMD, Chemical Engineering Journal 149, no. 1, pp. 191-195, 2009.
22. Mehta, D., Gupta, L., and Dhingra, R., Forward Osmosis in India: Status and Comparison with Other Desalination Technologies, International Scholarly Research Notices, 2014.
23. McGinnis, R.L., Hancock, N.T., Nowosielski-Slepowron, M.S., and McGurgan, G.D., Pilot demonstration of the NH₃/CO₂ forward osmosis desalination process on high salinity brines, Desalination 312, pp. 67-74, 2013.
24. Oasys Water, USA, <http://oasyswater.com>.
25. نفت نیوز، به ازای تولید 4.2 میلیون بشکه نفت، 450 هزار بشکه آب آلوده به محیط زیست تحویل می‌دهیم، 1393. لینک: <http://www.naftnews.net/view/16722/>