کاربرد اسمز معکوس در تهیه آب شیرین

مهندس محمد جعفر طاهرزاده* شهره سلیمی و
حورا رمضانی

مقدمه

بطورکلی تاکنون فرآیندهای مختلفی در زمینه تصفیه آب و فاضلاب شناخته شده است که انتخاب هر یک از آنها به عواملی نظیر مواد آلوده کننده موجود، کیفیت تصفیه مورد نیاز و تا حد زیادی به راندمان اقتصادی فرآیند بستگی دارد. در کنار روشهای معمول تصفیه آب، تکنیک فیزیکی جداسازی غشایی اسمز معکوس (RO)[1] از اهمیت بالایی برخوردار است. این تکنیک به تنهایی و یا بطور ترکیبی با سایر سیستمها، املاح معدنی و آلی آب را با قدرت بالایی حذف می‌نماید.

در این مقاله، ابتدا توضیحی اجمالی بر اسمز معکوس ارائه گردیده و سپس به مقایسه اقتصادی این فرآیند با دیگر روشهای شیرین سازی آب پرداخته شده است.

اسمز و اسمز معکوس

پدیدهٔ اسمزی، تمایل حلال خالص برای وارد شدن در محلولی است که توسط یک غشاء نیمه تراوا (غشایی که نسبت به حلال تراوا، و نسبت به حل شونده غیر تزاوا است) از حلال جدا شده باشد. بدین ترتیب آب خالص که توسط یک غشاء نیمه تراوا، از محلول آب نمک جدا شده است، بطرف محلول آب و نمک جریان می‌یابد (اسمز طبیعی).

نیروی محرکه برای این جریان اختلاف پتانسیل شیمیایی بین دو محلول است که در اینجا به صورت اختلاف غلظت ظاهر شده است. در اثر این گرادیان غلظت، به تدریج آب خالص وارد محلول آب نمک شده و این کار تا جایی ادامه می‌یابد که فشار محلول آب نمک تا حد مشخصی از فشار آب خالص بیشتر گردد و پتانسیل شیمیایی دو طرف غشاء برابر گردد. این فشار، بنام "فشار اسمزی" معروف است. اگر به روشهای مکانیکی، فشاری بیش از فشار اسمزی به محلول آب نمک وارد گردد، باعث افزایش پتانسیل شیمیایی محلول آب نمک نسبت به محلول آب خالص شده و در نتیجه، آب از

---

*- دانشگاه صنعتی اصفهان - دانشکده مهندسی شیمی

1- *Reverse osmosis*

سمت محلول آب نمک به طرف آب خالص جریان می‌یابد. به این جریان معکوس، "اسمز معکوس" گفته می‌شود.

بدین ترتیب، فرآیند RO قادر است نمکهای محلول را به وسیلهٔ مکانیزم فیزیکی کاهش دهد. در اینجا غشاء نقش یک غربال مولکولی را ایفاء می‌کند. بطوری که نمکهای محلول نظیر سدیم و کلر و همچنین مولکولهای درشت، باکتریها، ویروسها و ... را نگه داشته و به آب خالص اجازه عبور می‌دهد. این انتخاب‌گری غشاء در اثر خواص ساختمان مولکولی آن می‌باشد.

مدولهای[1] اسمز معکوس

همانگونه که بیان شد، اسمز معکوس یک فرآیند تحت فشار است. بطوری که بین دو طرف غشاء دهها اتمسفر اختلاف فشار وجود دارد. از طرف دیگر، فلاکس جریان نیز اندک می‌باشد. به عنوان مثال در یک مدول آزمایشگاهی غشاء دایره‌ای به قطر ۱۰ سانتی‌متر عبور جریان به صورت قطره قطره است. به همین خاطر باید در استفاده صنعتی از اسمز معکوس به نکات زیر توجه نمود:

الف : سطح زیادی از غشاء باید در یک حجم کم قرارگیرد.

ب : وجود یک نگهدارنده[2] سبک و در عین حال مقاوم در برابر فشارهای عملیاتی در محدوده ۸۵-۱۴ اتمسفر ضروری می‌باشد.

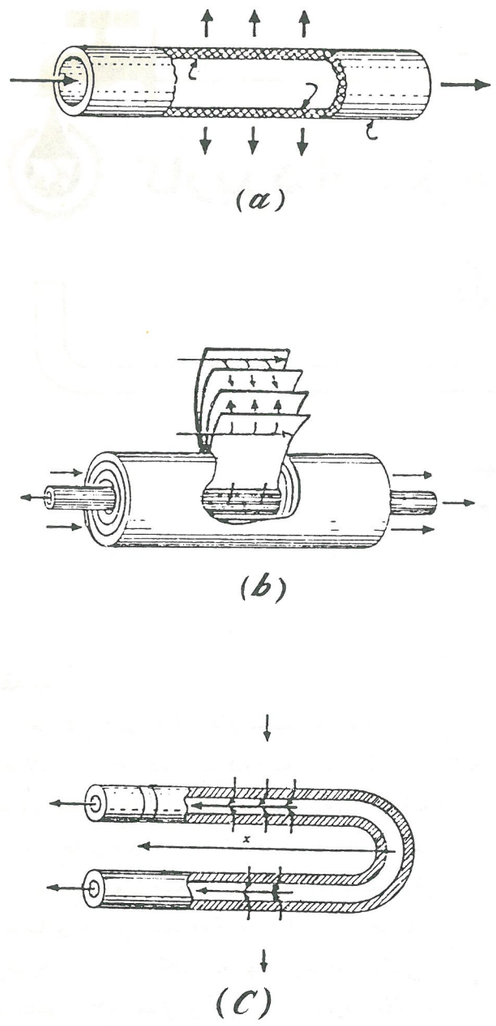
ج : پلاریزاسیون غلظتی روی سطح غشاء (در سمت فشار قوی) باید به حداقل خود برسد.

د : گرفتگی[3] و کثیف شدن غشاء باید کم باشد و تمیز سازی آن به سهولت انجام پذیرد.

ه : جایگذاری غشاء در مدول باید به نحوی انجام پذیرد که امکان وارد شدن خوراک به جریان محصول وجود نداشته باشد.

با توجه به این فاکتورها، مهمترین مدولهای غشایی اسمز معکوس که امروزه در مقیاس بزرگ و تجاری ساخته می‌شوند عبارتند از مدول لوله‌ای[4] مدول حلزونی[5] و مدول هالوفایبر[6] (شکل ۱)

انتخاب این مدولها بر اساس آنالیز آب خام و همچنین کیفیت آب تصفیه شده و بالا بودن نسبت سطح به حجم غشاء صورت می‌گیرد.



شکل ۱ـ ساختمان غشاء در (a) مدول لوله‌ای در (b) مدول حلزونی در (c) مدول هالوفایبر

نسبت سطح به حجم غشاء برای این مدولها در جدول (۱) آمده است.

در ادامه توضیح مختصری راجع به هر یک از این مدولها خواهیم داشت.

1- *Modules*
2- *Support*
3- *Fouling*
4- *Tubular*
5- *Spiral module*
6- *Hollow fiber module*

جدول (۱) نسبت سطح به حجم در مدولهای مختلف

نوع مدول	نسبت سطح به حجم (m^2/m^3)
لوله‌ای	۳۳۵
حلزونی	۱۰۰۰
هالوفایبر	۱۶۵۰۰

مدول هالوفایبر

در این مدول الیاف توخالی که معمولاً از جنس تری استات سلولز یا پلی آمیدهای آروماتیکی می‌باشد به میزان زیادی در اطراف یک لوله سوراخدار (مشبک) مرکزی تجمع می‌یابد. انتهای آزاد این الیاف توخالی در داخل یک محفظه پلاستیکی (معمولاً رزین اپوکسی) قرار داده می‌شود که جریان خوراک با فشار از طریق لوله مرکزی سوراخدار، وارد فضای خالی بین الیاف شده و بین آنها توزیع می‌گردد. در این حالت فقط آب خالص تحت فشار خوراک، از بین دیواره بیرونی الیاف به داخل آنها نفوذ نموده و وارد الیاف می‌گردد. سپس به طرف محفظه آزاد اپوکسی رانده شده و در فشار اتمسفری وارد جریان محصول می‌گردد. جریان تغلیظ شده بین دسته الیاف نیز در محفظه خارجی مدول تجمع یافته و با فشار اندکی کمتر از فشار خوراک در قالب جریان پساب (تغلیظ شده) خارج می‌گردد.

از مزایای مدول هالوفایبر، نسبت سطح به حجم بسیار بالایی است که در مقایسه با سایر مدولها دارا می‌باشد. قطر داخلی این الیاف توخالی حدود ۴۲-۲۰ میکرومتر و قطر خارجی آن معمولاً دو برابر قطر داخلی است.

مدول حلزونی

در این مدول می‌توان در هر محفظه فشار، بین ۱ تا ۷ المنت حلزونی قرار داد. هر المنت حلزونی خود شامل یک غشاء مسطح و یک صفحه فلزی حامل[1] می‌باشد که با هم به دور یک مرکزی سوراخدار پیچیده شده‌اند. خوراک تحت فشار به داخل مدول تزریق می‌شود. جریان آب تصفیه شده در نتیجهٔ عبور از غشاء، بر روی صفحات حامل ریخته و از این طریق به لوله مرکزی سوراخدار می‌رسد و سپس از درون لوله به جریان محصول وارد می‌گردد. جریان پساب نیز از طرف دیگر مدول خارج می‌شود.

مزّیت این مدول نسبت به هالوفایبر، توانایی بهتر تحمل ذرات درشتی است که از فیلتر و دیگر سیستمهای پیش تصفیه گذشته و وارد مدول شده است.

مدول لوله‌ای

در این مدول غشاها به صورت لوله‌ای ساخته شده و در داخل یک لوله متخلخل فولاد ضد زنگ و یا پلاستیک تقویت شده با فایبر گلاس قرار داده می‌شوند. محلول خوراک تحت فشار به داخل لوله غشاء تزریق شده و محلول تصفیه شده از جدارهٔ غشاء به بیرون تراوش می‌کند. قطر این لوله‌ها معمولاً بین ۱ تا ۲/۵ سانتی‌متر بوده و در مواردی نیز غشاء مستقیماً به صورت یک لوله متخلخل طراحی می‌گردد.

از مهمترین مزایای این مدول آن است که گرفتگی آن بسیار دیر اتفاق می‌افتد و تمیز کردن آن به راحتی توسط لوله پاک کن صورت می‌گیرد، بدون آنکه نیازی به باز کردن تجهیزات باشد.

این مزیت علی‌رغم کم بودن نسبت سطح به حجم باعث شده است که برای تهیه آب خالص از جریانهای پساب کارخانجات و فاضلابها بکار گرفته شود.

برای تصفیه آب نیز معمولاً در واحدهایی که آب خام ورودی بسیار صاف باشد (آب چاهها) از مدول هالوفایبر استفاده می‌گردد و در غیر این صورت (شیرین کردن آب دریا) ابتدا از یک مدول حلزونی و سپس از یک مدول هالوفایبر به صورت سری استفاده می‌شود.

هر یک از این مدولها، معمولاً بر حسب میزان غلظت نمک به سه دست زیر تقسیم بندی می‌شوند:

الف : مدول فشار پایین ـ جهت تصفیه آب در محدوده غلظتی

1- *Spacer*

نمک کمتر از ۳۰۰۰PPM فشار عملیاتی این مدولها بین ۱۴ تا ۱۷ اتمسفر است.

ب : مدول فشار متوسط ـ جهت تصفیه آب در محدودهٔ غلظتی نمک حدود ۱۰۰۰۰PPM-۲۵۰۰ با فشار عملیاتی بین ۲۸ تا ۴۰ اتمسفر

ج : مدول فشار بالا ـ جهت تصفیهٔ آب در محدوده غلظتی نمک ۵۰۰۰۰PPM-۱۰۰۰۰ با فشار عملیاتی بین ۵۶ تا ۸۵ اتمسفر

مقایسه اسمز معکوس با دیگر روشهای نمک زدایی آب

ملاحظات اقتصادی موجب گردیده که فرآیندهای متنوعی جهت نمک زدایی ابداع و توسعه یابد. از جمله می‌توان به اسمز معکوس (RO) و الکترودیالیز (EDR)[۲] و روشهای غیر غشایی مانند تبخیر ناگهانی چند مرحله‌ای (MSF)[۳] تقطیر چند مرحله‌ای (MED)[۴] فشرده سازی بخار (VC)[۵] و ... اشاره کرد.

جدول ۲: انرژی مصرفی برای نمک زدایی از آب شور (۱۰۰۰۰ppm) توسط تکنیکهای مختلف

نوع تکنیک	انرژی مصرفی (کیلووات ساعت درمترمکعب)	کیفیت آب (ppm)	درصد بازیابی
VC	۲۴	۵	۵۷
RO	۵/۳	۱۵۰	۵۰
MSF	۳۷	۵	۲۵
EDR	۱۰/۵	۵۰۰	۳۳

عملیات پیش تصفیه

بطور کلی غشاهای مورد استفاده در مدولهای اسمز معکوس، در مقابل بعضی از ترکیبات و آلودگیهای آب، حساس بوده و در صورتی که از سیستم پیشْ تصفیه مناسب استفاده نگردد، به سرعت از بین خواهند رفت. لیکن با قرار دادن این سیستمها قبل از واحد اسمز معکوس، عمر غشاها به بیش از سه سال خواهد رسید.

البته سیستم تصفیه به کیفیت آب خام ورودی، جنس غشاء و نوع مدول انتخابی بستگی دارد. لیکن، سیستمهای رایج، معمولاً شامل لخته‌سازی ته‌نشینی، فیلتراسیون (فیلتر شنی و کربن فعال) سختی گیری به وسیله رزینهای تعویض یونی و ضد عفونی می‌باشد. همچنین قبل از ورود این جریان پیش تصفیه شده به RO، یک مرحله حذف ذرات خیلی ریز (تا حد ۱۰ میکرومتر) توسط فیلترهای فشنگی[۱] که جزء متعلقات واحد RO است نیز صورت می‌گیرد.

این ملاحظات، مشکلات بهره‌برداری را کمتر کرده و عمر مفید سیستم را افزایش می‌دهد.

از لحاظ اقتصادی برای آبهای نیمه شور TDS بین ۵۰۰ تا ۵۰۰۰ PPM، فرآیندهای غشایی RO و EDR با هم در رقابت بوده و در غلظتهای بالاتر فقط RO مقرون به صرفه است

در غلظتهای بالاتر از ۳۰۰گرم نمک در لیتر فرآیند اقتصادی RO دیگر مقرون به صرفه نبوده و روشهای حرارتی مطرح می‌باشند.

علت اصلی این موضوع را می‌توان در مصرف نسبتاً کم انرژی در اسمز معکوس یافت (جدول ۲)

انرژی مورد نیاز فرآیند RO شامل انرژی مورد نیاز برای پمپها جهت ایجاد فشار برای خوراک می‌باشد که هزینه عمده این فرآیند را تشکیل می‌دهد. در روش EDR نیاز به انرژی الکتریکی نیز بوده و در روشهای حرارتی احتیاج به سوخت می‌باشد.

1- *Cartridge filter*
2- *Electrodialysis Reversal*
3- *Multi stage flash*
4- *Multi Effat Distillation*
5- *Vapor Compression*

دیگر هزینه‌های اسمز معکوس، شامل هزینه خرید مواد شیمیایی و عملیات تصفیه مقدماتی می‌باشد. مجموع این هزینه‌ها برای تهیه آب شیرین به روش اسمز معکوس بر اساس تکنولوژی امروزی دنیا، در جدول ۳ آمده است.

۲/۴۸ دلار به ازاء هر مترمکعب آب شیرین محاسبه شده است.

به کمک این اعداد و ارقام می‌توان به اقتصادی بودن واحدهای RO نسبت به سایر واحدهای مشابه پی برد.

جدول ۳: هزینه تهیه آب شیرین به روش اسمز معکوس

مشخصات آب خام	ظرفیت واحد m^3/day	هزینه تصفیه $/m^3$ هرمترمکعب آب شیرین	هزینه مصرف انرژی الکتریکی $/m^3$
آب نیمه‌شور باغلظت کمتر از ۴۰۰۰ppm	۱۱۰۰۰-۴۵۰۰۰	<۰/۴	۰/۰۷
آب دریا	<۱۹۰۰	<۲/۶۴	۰/۱۲
آب دریا	بین ۱۹۰۰ و ۵۷۰۰۰	<۱/۱	۰/۰۷
آب دریا >۵۷۰۰۰	۰/۸ (واحدهای بزرگ)	ناچیز	

بر اساس اطلاعات موجود از شرکتهای خارجی، کل سرمایه اولیه مورد نیاز شامل هزینه خرید تجهیزات، حمل و نقل، نصب و راه‌اندازی برای یک واحد آب نیمه شور با ظرفیت ۴۵۵۰۰ مترمکعب در روز برای یک واحد RO معادل ۲۳۱۸۴۰۰۰ دلار و برای یک واحد EDR برابر ۲۶۹۸۰۰۰۰ دلار است (سال ۱۹۸۹) هزینه‌های بهره‌برداری نیز برای این دو واحد به ترتیب ۰/۳۴ و ۰/۳۶ دلار در هر مترمکعب بوده است.

در مقایسه دیگری که برای تصفیه (شیرین سازی) آب دریا انجام شده است، در ظرفیت ۳۸۷۵۰ مترمکعب در روز سرمایه اولیه مورد نیاز واحدهای Msf, MED, RO به ترتیب ۴۹۷۰۰۰۰۰، ۷۰۴۰۰۰۰۰ و ۶۰۵۰۰۰۰۰ دلار برآورد شده است. هزینه بهره از این واحدها نیز به ترتیب ۱/۰۹، ۱/۰۸ و ۱/۲۵ دلار در هر مترمکعب آب شیرین شده، ذکر گردیده است.

در برآورد دیگری نیز برای یک واحد کوچک شیرین سازی آب دریا، به عمل آمده است، در ظرفیت ۴۰۰ مترمکعب آب شیرین در روز، سرمایه اولیه مورد نیاز واحد VC, RO به ترتیب ۸۴۳۵۰۰ و ۹۹۴۰۰۰ دلار بیان گردیده است. هزینه‌های بهره‌برداری نیز به ترتیب ۱/۹۸ و زیرا اولاً سرمایه کمتری نیاز داشته و ثانیاً هزینه‌های بهره‌برداری آن کمتر از سایرین می‌باشد. بنا به همین دلائل بوده است که اکثر سیستمهای آب شیرین کن جهان اسمز معکوس است به عنوان مثال نزدیک به نیمی از آب شیرین‌کنهای حاشیه خلیج فارس و دریای عمان، از همین روش استفاده می‌کنند.

امروزه بسیاری از صنایع جدیدالتأسیس کشور که نیاز به آب خالص دارند، به اسمز معکوس روی آورده‌اند. از جمله این موارد می‌توان به صنایع دارویی و صنایع الکترونیک اشاره کرد.

محصول نهایی خروجی از واحد RO در این صنایع، آب عاری از هر ناخالصی است که هدایت الکتریکی آن کمتر از $۱\frac{\mu s}{cm}$ است.