

طراحی دستگاه تصفیه آب اسمز معکوس (آب شیرین کن صنعتی) در ۱۰ مرحله

امروز ۱۰ مرحله لازم برای طراحی یک سیستم اسمز معکوس یا گذرندگی وارونه را به شما معرفی می‌کنیم. کارخانه مهتاب (mahaab.com)، تولیدکننده حرفه‌ای سیستم اسمز معکوس است. این کارخانه بیش از ۱۰۰۰ دستگاه تصفیه آب اسمز معکوس را برای استفاده‌های تجاری و صنعتی طراحی کرده است. اکنون طراحی سیستم و دستگاه اسمز معکوس را مرحله به مرحله با هم بررسی می‌کنیم.

۱. منابع آب مصرفی و کیفیت آب آشامیدنی و آب تصفیه شده را بررسی و آزمایش کنید.

همان‌طور که می‌دانید، تنها ۲ درصد از کل آب کره زمین را آب شیرین تشکیل می‌دهد. منابع آب‌های دیگر مانند آب‌های زیرزمینی، آب رودخانه‌ها، دریاها، اقیانوس‌ها و دریاچه‌ها را نمی‌توانید به طور مستقیم به‌عنوان آب آشامیدنی استفاده کنید؛ زیرا این آب‌ها ترکیبات معدنی و آلی خطرناک و همچنین باکتری‌ها و ویروس‌های مختلفی دارند؛ بنابراین باید حتماً این آب‌ها را تصفیه کنیم.

نتیجه آزمایش و سنجش کیفیت آب برای طراحی یک آب شیرین کن اسمز معکوس مهم است. ابتدا باید درباره کیفیت منبع آب دستگاه تصفیه خود اطمینان حاصل کنید. بهترین راه این است که یک بطری آب را به آزمایشگاهی در شهر خود بفرستید تا متخصصان آن را بررسی کنند.

DETERMINANTS CONSTITUENTS	Results expressed in mg/t unless specifically stated.	
	Purified Rainwater	WHO-QC Standard Recommended Limits
Conductivity ($\mu\text{S/cm}$)	148	Not Specified
Total Dissolved Solids (TDS @ 105 °C)	103	< 500
Total Suspended Solids (TSS)	BDL	Must be absent
Turbidity (NTU)	0.16	< 0.5 (Target < 0.2)
NTU after 0.2- μ lab filtration test	0.14	Shows filterable content
Colour (Pt/Co Units)	15	< 30 (Target < 20)
Odour (Instrumentation) (TON)	Not Done	< 5.0 (Target < 4.0)
pH	7.12	6.5 to 8.5
Alkalinity (Total)	29.3	20 to 200
Total Hardness (TDH as CaCO_3)	3.73	20 to 200
Calcium (Ca as CaCO_3)	3.44	10 to 200
Magnesium (Mg as CaCO_3)	0.29	5 to 150
Aluminium (Al) ($\mu\text{g/t}$)	BDL	< 150
Copper (Cu) ($\mu\text{g/t}$)	7	< 200
Iron (Fe) Total ($\mu\text{g/t}$)	BDL	< 200 (Target < 20)
Iron (Fe – Dissolved) ($\mu\text{g/t}$)	BDL	Target < 20
Manganese (Mn) Total ($\mu\text{g/t}$)	BDL	< 50 (Target < 10)
Total Heavy Metal Content ($\mu\text{g/t}$)	BDL	< 10 (Target = 0)

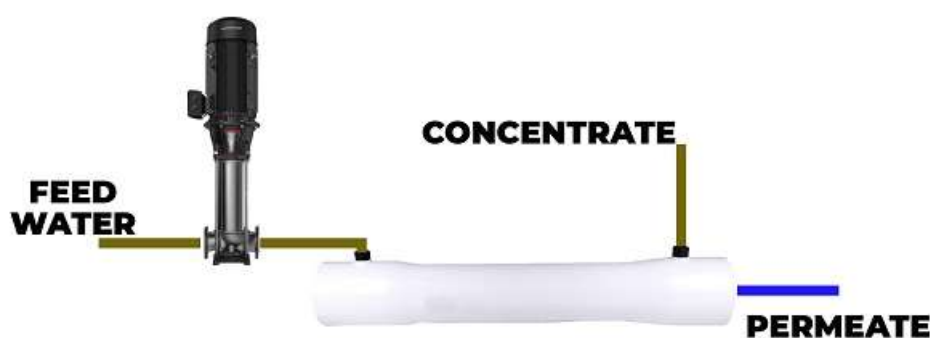
متخصصان آزمایشگاه پس از تجزیه و تحلیل، نتیجه تحقیقات خود را در قالب گزارشی مانند گزارش بالا به شما ارائه می‌دهند. پس از دریافت نتیجه آزمایش، اول از همه سطح TDS آب که در نتیجه آزمایش گزارش شده است، بررسی کنید. TDS همان مقدار کل ذرات جامد انحلال پذیر یا به اصطلاح ساده تر سختی کل آب است. سطح TDS بر اساس کاربردهای مختلفی که مدنظر شما بوده، باید متفاوت باشد.

مثلاً اگر از آب تصفیه شده برای صنعت داروسازی استفاده می‌کنید، سطح TDS باید کمتر از ۱ پی پی ام باشد. برای آبیاری سطح TDS باید کمتر از ۵۰۰ پی پی ام بوده و برای استفاده به عنوان آب آشامیدنی، سطح TDS باید حدود ۱۰۰ - ۵۰۰ پی پی ام باشد.

۲. نوع جریان آب را مشخص کنید.

به طور کلی دو نوع جریان آب وجود دارد، یکی جریان سیال آب در لوله و دیگری گردش مجدد کنسانتره. همه سیستم‌ها از طریق برق کار می‌کنند. همان طور که در تصویر زیر مشاهده می‌کنید، آب خام ورودی به دستگاه آب شیرین کن از فیلترهای ممبران عبور کرده و شما آب شیرین تولید شده از فرایند اسمز معکوس که حاوی غلظت کمی از جامدات محلول است را دریافت می‌کنید.

اما گاهی اوقات، در صورت امکان، برای افزایش راندمان نفوذ در تمام سیستم‌ها، آب غلیظ شده را به دیگ بخار و بویلرهای بخار ارسال می‌کنیم. این نوع جریان، گردش مجدد کنسانتره است. این امر بستگی به سطح TDS آب، میزان برگشت پذیری و نوع ممبران دارد؛ بنابراین نوع جریان یکی دیگر از معیارهای مهم طراحی یک دستگاه اسمز معکوس است.



در اینجا می‌توانید نحوه عملکرد سیستم اسمز معکوس و روش گردش مجدد کنسانتره را در تصویر زیر ببینید.



تشخیص نوع جریان مناسب برای سیستم تصفیه آب نیاز به تجربه و دانش فنی دارد.

۳. Membrane و نوع آن را مشخص کنید.

در طراحی یک پکیج اسمز معکوس، عناصر مختلف را با توجه به شوری آب، رسوب‌گذاری آب و انرژی مورد نیاز انتخاب می‌کنند. اولین عاملی که باید در نظر بگیرید، منابع آبی است که آب شما را تأمین می‌کند.

اگر منابع آب دستگاه شما شور باشند، باید از ممبران‌های (membrane) اسمز معکوس از نوع BW استفاده کنید. اگر منبع آب خود را از دریا تأمین کرده، شما باید از ممبران SW استفاده کنید. TDS برای آب شور بین ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر و در آب دریا بیش از ۱۵۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر است. در ادامه باید بگوییم که واحد یک میلی‌گرم در هر لیتر برابر با ۱ ppm است.

۴. شار آب

کارخانه‌های تصفیه آب با توجه به سرعت جریان آب و میزان بازیابی یا بازگردانی آن، یک پکیج اسمز معکوس طراحی می‌کنند. میزان برگشت‌پذیری (بازیابی) یا بازیافت آب به این معنی است که چند درصد از آب‌های مصرف شده در صنایع مختلف مجدد برای صنایع دیگر به مصرف می‌رسند. عاملی که بیشترین تأثیر را در طراحی سیستم ممبران دارد، مکانیسم رسوب‌گذاری آب آشامیدنی است.

یک سیستم membrane (ممبران) باید به‌گونه‌ای طراحی شود که هر یک از اجزای آن بر اساس دستورالعمل‌های توصیه شده به‌گونه‌ای عمل کند که میزان رسوب را به حداقل برساند و از آسیب مکانیکی جلوگیری کند. این دستورالعمل‌ها شامل موارد زیر است:

- حداکثر میزان بازیابی یا بازیافت آب
- حداکثر میزان آب تصفیه شده
- حداقل پساب غلیظ

• حداکثر میزان شار (جریان) آب ورودی

مقدار شار پیشنهادی توسط برخی از صاحبان پکیج های اسمز معکوس باتوجه به SDI (شاخص چگالی سیلت یا شاخص چگالی لجن) را می توانید در جدول زیر مشاهده کنید. به عنوان مثال در جدول زیر شاخص SDI آب چاه کمتر از ۳ بوده و میانگین شار سیستم ۲۲ تا ۲۹ لیتر مربع در هر ساعت است. حداقل نرخ شار ۲۲ بوده، حداکثر آن ۲۹ و حداکثر نرخ بازیابی عنصر نیز ۱۹٪ بیان شده است. این مقادیر در طراحی یک دستگاه تصفیه آب اسمز معکوس بسیار مهم هستند.

Feed source	RO Permeate	Well Water	Surface Water			Wastewater (Filtered Municipal Effluent or Industrial Effluent)			Seawater		
			Surface Water with DOW™ Ultrafiltration	Generic membrane filtration or advanced conventional pretreatment	Generic conventional pretreatment	DOW™ Ultrafiltration	Generic membrane filtration (MBRM/UF)	Conventional pretreatment	Well or Open Intake with DOW™ Ultrafiltration	Open Intake with generic membrane filtration or advanced conventional pretreatment	Open Intake with generic conventional pretreatment
Feed salt density Index (%/min)	SDI < 1	SDI < 3	SDI < 2.5	SDI < 3	SDI < 5	SDI < 2.5	SDI < 3	SDI < 5	SDI < 2.5	SDI < 3	SDI < 5
Maximum element recovery %	30	19	19	17	15	14	13	12	15	14	13
Design Flux range	36 - 43	27 - 34	27 - 34	22 - 29	20 - 27	19 - 26	17 - 24	14 - 20	15 - 19	13 - 17	11 - 17

۵. محاسبه ماژول

برای محاسبه عدد ماژول باید مطالب زیر را بدانید:

- دبی آب تصفیه شده خروجی (۳ مترمکعب در روز (Qp))
- سطح فعال فیلتر ممبران (۲ مترمربع)
- شار (۲ لیتر مربع در هر ساعت)

دبی آب تصفیه شده خروجی یا Permeate flow در واقع ظرفیت دستگاه شما است و نشان می دهد که به چه مقدار آب در روز نیاز دارید. شما می توانید اطلاعات و مشخصات کامل ممبران را از فروشنده بپرسید. همان طور که اشاره کردیم، شاخص شار ۲ لیتر مربع در هر ساعت است.

پس از تعیین نوع ماژول مانند SW یا BW بر اساس منبع تغذیه و TDS، به بروشوری که فروشنده ارائه می دهد، نگاه کنید. می توانید به اطلاعات مهمی مانند عملکرد ممبران، توضیحات کلی محصول، روش استفاده از آن و محدودیت هایی که دارد، با مطالعه بروشور دست پیدا کنید.

به عنوان مثال با برند ۴۰۰-۳۰ Dupont Filmtec BW آشنا شوید. در تصویر زیر می بینیم که شاخص دبی آب تصفیه شده خروجی ۴۰ مترمربع در هر سه روز بوده و ممانعت عبور نمک یا همان توانایی ممبران برای جلوگیری از عبور املاح ۹۹ درصد است.

Typical Properties

FilmTec™ Element	Active Area		Feed Spacer	Permeate Flow Rate		Typical Stabilized	Minimum Salt
	(ft ²)	(m ²)	Thickness (mil)	(GPD)	(m ³ /d)	Salt Rejection (%)	Rejection (%)
BW30-400/34	400	37	34	10,500	40	99.5	99.0

همچنین در اینجا اندازه ممبران را می‌توانید مشاهده کنید. قطر آن ۷,۹ اینچ است که می‌توان گفت نزدیک به ۸ اینچ بوده و طول آن ۴۰ اینچ است؛ بنابراین در بازار به‌عنوان ۸۰۴۰ نام‌گذاری شده و شناخته می‌شود.

برای محاسبه تعداد ممبران برای اسمز معکوس از این معادله استفاده می‌کنیم:

فرمول محاسبه تعداد ممبران:

$$N_E = \frac{Q_p}{f \cdot A_E}$$

به‌عنوان مثال ما آب چاه داریم، شاخص SDI آب چاه کمتر از ۳ است. جدول خود را بررسی می‌کنیم. نرخ شار ۲۹ - ۲۲ است. اگر می‌خواهید حداکثر تعداد ممبران را محاسبه کنید، باید از ۲۲ استفاده کرده و برای حداقل تعداد ممبران باید از ۲۹ استفاده کنید.

به‌عنوان مثال ۶۰۰۰ لیتر آب در هر ساعت احتیاج داریم. میزان جریان نفوذ آب (دبی آب تصفیه شده خروجی) Q_p است. TDS آب چاه ما بالاتر از ۱۰۰۰۰ ppm است؛ بنابراین آب شور بوده و ما باید ممبران نوع BW که مخصوص آب شور است را انتخاب کنیم.

این مشخصات ممبران BW^{۳۰-۴۰۰} Dupont Filmtec بوده و مساحت فعال ممبران، ۳۷ مترمربع (A_e) است. حال از معادله استفاده می‌کنیم و عدد را برای طراحی [دستگاه تصفیه اسمز معکوس](#) در معادله قرار می‌دهیم:

$$N_{e \min} = 6000 / (37 \times 29) = 7,3 = 6$$

$$N_{e \max} = 6000 / (37 \times 22) = 5,59 = 7$$

همان‌طور که مشاهده می‌کنید، برای سیستم ۶۰۰۰ lph می‌توانید از ممبران ۶ تکه استفاده کنید.

۶. محاسبه عدد مخزن تحت فشار (N_v)

تعداد کل مخزن‌های تحت فشار موردنیاز = تعداد کل ماژول یا همان تعداد ماژول در یک مخزن تحت فشار

عدد به دست آمده را باید به نزدیک‌ترین عدد صحیح گرد کنید. مثلاً اگر عدد شما ۵,۸۹ است؛ بنابراین می‌توانید از ۶ لوله برای انتقال آب استفاده کنید. برای سیستم‌های بزرگ لوله یا مجرا استاندارد است؛ اما برای سیستم‌های کوچک‌تر یا فشرده، ممکن بوده لوله‌های کوتاه‌تری لازم داشته باشید.

به‌عنوان مثال اگر سیستم تصفیه شما کوچک باشد، مثلاً اگر ظرفیت آن ۲۵۰ یا ۵۰۰ لیتر در ساعت است، فقط یک یا دو ممبران ۴۰۴۰ کافی بوده؛ اما اگر نمونه سیستم اسمز معکوس ۶۰۰۰ lph را بررسی کنید، متوجه می‌شوید که به ۶ ممبران نیاز است.

اندازه محفظه‌های ممبران و مخزن‌های تحت فشار تقریباً در همه جای دنیا یکسان هستند؛ اما هر کشوری از اصطلاحات متفاوتی برای آنها استفاده می‌کند.

۷. محاسبه بازیابی (S) %

بازیافت یا بازیابی نسبت دبی آب تصفیه شده خروجی به دبی آب خام ورودی به آب شیرین‌کن است که با این معادله محاسبه می‌شود:

$$S = \frac{\text{permeate flow rate}}{\text{feed flow rate}}$$

با افزایش بازیابی یا بازیافت آب، فشار ممکن است تا حدی افزایش یابد؛ اما آب شور غلیظ‌تر خواهد شد که این می‌تواند دفع پسماند و مواد خطرناک از آب را دشوارتر کند.

در سیستم RO یا همان اسمز معکوس، قابلیت recovery (بازیافت آب) در واقع تابعی از salt rejection (میزان جلوگیری از عبور هر نوع املاح) است؛ بنابراین درصد املاحی که در یک طرف ممبران می‌مانند و به سمت دیگر نفوذ نمی‌کنند، از طریق محاسبه مقدار salt rejection یا MWCO به دست می‌آید.

حال ممکن است این سوال برای شما پیش بیاید که MWCO چیست. MWCO وزن مولکولی است که در آن ۹۰ درصد املاح ماکرومولکولی از فیلتر ممبران عبور نمی‌کند. salt rejection بر اساس فرمول زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Rej} = \frac{1 - C_P}{C_F}$$

حروف اختصاری:

- Rej = جلوگیری از عبور یون مدنظر
- C_P = غلظت یون مدنظر در آب تصفیه شده
- C_F = غلظت یون مدنظر در آب ورودی

از Rejection می‌توان برای محاسبه شاخص‌های بزرگی مانند TDS (مواد جامد محلول در آب) یا رسانایی استفاده کرد.

شاید بهتر باشد با یک مثال نحوه استفاده از این معادله را در طراحی دستگاه اسمز معکوس توضیح دهیم:

اگر آب شور داشته باشیم TDS آن ۱۲۰۰۰ ppm است و ما می‌خواهیم جهت آبیاری، آب شیرین ppm ۵۰۰ به دست آوریم. ما از ممبران BW استفاده می‌کنیم که دفع نمک آن ۹۷ درصد است.

ما معادله زیر را داریم:

$$C_P = \frac{C_F}{S} * [1 - (1 - S)^{1 - \text{Rej}}]$$

اگر نمی‌دانید چگونه اعداد لگاریتمی و نمایی را محاسبه کنید، می‌توانید به راحتی با روش آزمون و خطا این کار را انجام دهید. در این روش برای محاسبه میزان بازیابی سیستم آب شور باید به S بین ۰,۴۰ تا ۰,۷۰ مقدار دهیم؛ لذا با ۰,۴۵ شروع می‌کنیم و ما ۰,۵۶ را به دست آوردیم که به این معنا بوده که میزان بازیابی یا بازیافت ۰,۵۶ درصد است.

۸. محاسبه تعداد مراحل

محاسبه تعداد مراحل به شما کمک می‌کند تا متوجه شوید به چند مخزن تحت فشار احتیاج دارید. همچنین با محاسبه تعداد مراحل می‌توانید تشخیص دهید که به دستگاه آب شیرین‌کن یک مرحله‌ای نیاز دارید یا دستگاه آب شیرین‌کن دو مرحله‌ای.

در اینجا ما به شما دو جدول برای آب شور و آب دریا ارائه می‌دهیم. می‌توانید از این جدول‌ها برای انتخاب صحیح تعداد مراحل و میزان بازیابی استفاده کنید؛ اما برای اطمینان از انتخاب صحیح تعداد مراحل معمولاً از نرم‌افزارهایی به نام ROSA یا WAVE استفاده می‌کنند.

BW

System recovery (%)	Number of serial element positions	Number of stages (6-element vessels)
40 - 60	6	1
70 - 80	12	2
85 - 90	18	3

SW

System recovery (%)	Number of serial element positions	Number of stages (6-element vessels)	Number of stages (7-element vessels)	Number of stages (8-element vessels)
35 - 40	6	1	1	—
45	7 - 12	2	1	1
50	8 - 12	2	2	1
55 - 60	12 - 14	2	2	—

۹. نسبت بین مراحل را تعیین کنید.

رابطه تعداد مخزن‌های تحت فشار در مراحل بعدی را نسبت مرحله‌بندی می‌گویند که با R نشان می‌دهیم. برای سیستمی با چهار مجرا (لوله) در مرحله اول و دو لوله در مرحله دوم، نسبت مرحله‌بندی یک به دو است؛ بنابراین یک سیستم سه مرحله‌ای با چهار، سه و دو لوله در مرحله اول، دوم و سوم به ترتیب دارای نسبت مرحله‌بندی ۴، ۳ و ۲ است.

تعداد مخزن‌های تحت فشار در مرحله اول $N_v(1)$ را می‌توانید با کمک تعداد کل مخازن (N_v) و نسبت مرحله‌بندی (R) به دست آورید که طبق فرمول اول محاسبه می‌شود. نکته اینجاست که برای محاسبه اولین فرمول که در زیر این مطلب آورده‌ایم، ابتدا باید مقدار R را محاسبه کنید. برای محاسبه نسبت مرحله‌بندی (R) یک سیستم با n مرحله و با بازیافت سیستم (S) می‌توانید از معادله دوم که در زیر آمده کمک بگیرید.

$$N_v(1) = \frac{N_v}{1 + R^{-1}}$$

$$R = \left[\frac{1}{(1 - S)} \right]^{1/n}$$

۱۰. میزان دبی آب تصفیه شده خروجی را متعادل کنید.

میزان دبی آب تصفیه شده خروجی یک سیستم معمولاً کمتر از دبی آب خام ورودی به آب شیرین کن است که این نتیجه افت فشار در کانال و افزایش فشار اسمزی از منبع به کنسانتره است. در برخی شرایط خاص، نسبت دبی آب تصفیه شده خروجی در فیلتر ممبران اول و آخرین فیلتر ممبران می تواند بسیار زیاد شود. این اتفاق ممکن است به دلایل زیر رخ دهد:

- بازیافت بیش از حد سیستم
- شوری زیاد آب ورودی به سیستم
- ممبران های کم فشار
- دمای زیاد آب
- ممبران های جدید

هدف از طراحی پکیج تصفیه آب اسمز معکوس

هدف یک دستگاه اسمز معکوس این است که دبی آب را در موقعیت های مختلف متعادل کند. از طریق روش های زیر می توان به این هدف دست یافت:

- افزایش فشار آب ورودی بین مراحل
- وارد کردن فشار برگشتی فقط در مرحله اول یک سیستم دو مرحله ای
- سیستم هیبرید: از ممبران های با نفوذپذیری آب کمتر در شروع کار و ممبران های با نفوذپذیری بالاتر در موقعیت های آخر استفاده کنید. به عنوان مثال برای آب دریا در مرحله اول از ممبران های با توانایی بالا در جلوگیری از عبور املاح استفاده کرده و در مرحله دوم از ممبران های با بهره وری بالا استفاده کنید.

حتی اگر سیستم خود را با توجه به مراحل که ذکر کردیم و طبق این اطلاعات طراحی کنید، باز هم ممکن است با برخی مشکلات و خطاهای احتمالی مواجه شوید. برای رفع این خطاها و آنالیز کامل تر سیستم خود توصیه می کنیم حتماً از نرم افزارهای ROSA یا WAVE استفاده کنید. برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد طراحی پکیج آب شیرین کن اسمز معکوس، می توانید با همکاران ما در شرکت مهتاب تماس بگیرید.