

چگونه عملکرد سیستم اسمز معکوس را ارزیابی کنیم؟

فاطمه بکائی



کارشناس ارشد شیمی امور مهندسی و برنامه‌ریزی نیروگاه سیکل ترکیبی زواره
شرکت تولید برق منتظر قائم



سعید کردی زاده



kordizade.s@gmail.com

مدیر امور مهندسی و برنامه‌ریزی نیروگاه سیکل ترکیبی زواره
شرکت تولید برق منتظر قائم

کلمات کلیدی:

مانیتورینگ R.O - نرمالایز - ثبت دیتا - تحلیل عیب‌یابی

نظارت بر عملکرد سیستم اسمز معکوس یکی از وظایف اصلی بهره‌برداران در حوزه تصفیه آب صنعتی است. اطلاع از کارایی واقعی و درک مشکلات سیستم و اجرای اقدام اصلاحی لازم نیازمند ثبت پارامترهای عملیاتی سیستم است. در این مقاله معیارهای ارزیابی عملکرد سیستم‌های اسمز معکوس مورد بررسی قرار گرفته و معیارها و ابزارهای مورد استفاده در این زمینه معرفی می‌شود.



مقدمه

عملکرد مطلوب طولانی مدت سیستم RO به بهره‌برداری و نگهداری درست در مواردی شامل راه‌اندازی اولیه، استارت‌ها و خاموش کردن‌های سیستم بستگی دارد. جلوگیری از ایجاد فولینگ، رسوب، تخریب المنت مانند اکسید شدن و مشکلات طراحی، تنها مسایل سیستم نیست، بلکه باید بهره‌برداری مناسب و مقتضی از سیستم را نیز به عمل آورد. در این راستا ارزیابی عملکرد سیستم با هدف افزایش عمر مفید ممبران‌ها، بهبود کیفیت آب تولیدی، کاهش هزینه‌ها و افزایش راندمان سیستم با ثبت کامل و دقیق وقایع و اطلاعات عملیاتی مورد نیاز و لازم است.

1- مانیتورینگ سیستم RO

مانیتورینگ عملکرد سیستم R.O یک پیش نیاز اساسی برای اطمینان از بهره‌برداری صحیح است. ثبت منظم داده‌ها شرایط مناسبی برای عیب‌یابی سریع و پیشگیری از مشکلات فراهم می‌کند. ثبت سوابق و داده به صورت کلی شامل موارد زیر می‌شود:

1-1 گزارش راه‌اندازی شامل:

توصیف کامل R.O

گزارش کارایی اولیه سیستم پیش تصفیه و R.O مطابق شرایط زیر

2-1 ثبت پارامترهای عملکردی سیستم

کلیه پارامترهای عملکردی سیستم باید با ذکر تاریخ و زمان در لاگ‌شیت‌های مربوطه ثبت شوند. پارامترهای کلیدی برای مانیتورینگ سیستم شامل موارد زیر است.

۱. تست کیفیت آب

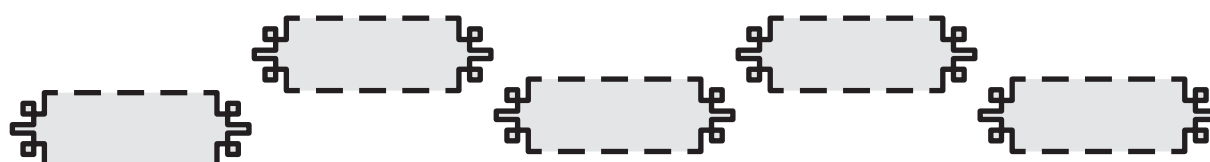
- هدایت الکتریکی: ارزیابی میزان دفع نمک و کارایی ممبران‌ها
- آنالیز شیمیایی: اندازه‌گیری پارامترهای شیمیایی مانند pH، غلظت یون‌های مختلف (کلسیم، منیزیم، سدیم، کلراید و غیره) برای اطمینان از تطابق با استانداردهای کیفیت.

۲. مانیتورینگ فشار

- فشار ورودی و خروج: به منظور شناسایی افت فشار غیرعادی و عملکرد صحیح پمپ‌ها.
- افت فشار: برای شناسایی فولینگ یا گرفتگی‌های احتمالی.

۳. مانیتورینگ دبی

- میزان جریان تولیدی: به منظور اطمینان از عملکرد بهینه سیستم و شناسایی هرگونه کاهش غیرمعمول در تولید.
- میزان جریان خوراک و ریجکت: برای ارزیابی توازن دبی‌ها و عملکرد کلی سیستم.



1-2 ثبت داده‌های عملیاتی پیش تصفیه

- ثبت مشخصات عملیاتی سیستم پیش تصفیه
- ثبت فشار خروجی پمپ‌ها: دو بار در روز
- ثبت فشار ورودی و خروجی کلیه فیلترها: دو بار در روز
- میزان مصرف اسید، آنتی اسکالانت و سایر مواد شیمیایی: یک بار در روز

1-3 گزارش نگهداری و تعمیرات

- نگهداری و تعمیرات روتین
- تعویض یا افزودن اجزای سیستم RO
- آسیب‌های مکانیکی و تعویض قطعات
- تعویض یا افزودن اجزای سیستم پیش تصفیه
- سوابق شستشو: شامل تاریخ، زمان شستشو، مواد شوینده، غلظت، دما و pH
- شدت جریان و فشار

2- نرمال سازی داده‌ها

بعد از ثبت داده یکی از مهم‌ترین اقدامات برای پیشگیری و رفع مشکلات سیستم نیاز است روند تغییرات به درستی تحلیل شود. در این خصوص به دلیل تغییر پیوسته شرایط عملیاتی (دما، فشار، غلظت)، امکان مقایسه عملکرد مشاهده شده مانند دبی جریان محصول در یک زمان با عملکرد مشاهده شده در زمانی دیگر، نمی‌باشد باید روند پارامترهای عملکردی سیستم در شرایط استاندارد مقایسه شود که این فرایند نرمال سازی داده‌ها نام دارد.

نرمالایز کردن داده‌های عملیاتی و فرایندی سیستم RO یک تکنیک است که به بهره‌بردار سیستم این امکان را می‌دهد تا عملکرد سیستم را با یک زمان مرجع ثابت (عملکرد طراحی شده یا عملکرد اولیه)، بدون توجه به تغییرات شرایط دمایی و فشار و...، مقایسه کنند. این روش برای مشخص کردن علت تغییرات به وجود آمده در پارامترهای عملیاتی سیستم کارآمد است و مشخص می‌کند که علت تغییرات در پارامترهای عملکردی کلیدی مانند دبی تولید، افت فشار یا کیفیت آب تصفیه شده طبیعی است و یا ناشی از یک مشکل پنهان در سیستم مانند فولینگ و یا آسیب به ممبران‌ها می‌باشد. پایش عملکرد سیستم به این روش موجب افزایش عمر سیستم به دلیل شناسایی سریع تغییرات می‌باشد.

برای نرمالایز کردن داده‌های RO، نیاز است از نرم‌افزارهای نرمالایز استفاده کنید. هر برند ممبران نرم‌افزار مخصوص خود را دارد:

برای ممبران‌های فیلمتک: FTNorm

برای ممبران‌های هایدراناتکس: RO DATA

برای ممبران‌های Toray: Toray Track

ورودی نرم‌افزار پارامترهای عملکردی سیستم است که در قسمت‌های قبل توضیح داده شد و در مرحله اول نیاز است کلیه داده‌های عملیاتی مثل دبی، فشار، هدایت الکتریکی و... به صورت منظم و دوره‌ای در یک فایل ترجیحا اکسل ثبت و پارامترهای مورد نیاز مرتب در نرم‌افزار ثبت شود. باید در نظر داشت در کنار ثبت پارامترهای عملکردی سیستم، دیتاهایی مانند کدورت، SDI، PH آب ورودی به سیستم نیز نیاز به ثبت دارد و اگرچه برای نرمالایز کردن دیتاها کاربرد ندارد اما می‌تواند در عیب‌یابی سیستم موثر باشند. در ادامه در پیوست در جدولی که بنا به توصیه یکی از سازندگان ممبران تهیه شده، به مهم‌ترین پارامترهای مانیتورینگ سیستم اشاره شده است.

شکل زیر صفحه مربوط به دیتاهای مورد نیاز برای نرم افزار FTNorm مربوط به ممبران‌هایی شرکت فیلمتک است.

Dow Reverse Osmosis and Nanofiltration Operating Data Normalization								Dow Reverse Osmosis and Nanofiltration Operating Data Normalization							
Plant Identification: Test Train Data								Plant Identification: Test Train Data							
Start-Up Date: ۱۲-۱۰-۲۰۰۷															
Date	Permeate Flow	Concentrate Flow	Feed Pressure	Concentrate Pressure	Permeate Pressure	Calculated Feed TDS	Feed Conductivity	Feed TDS	Calculated Perm TDS	Permeate Conductivity	Permeate TDS	Calculated Temp (C)	Feed Temp (F)	Feed Temp (C)	
۱۵-۱۰-۲۰۰۷	50	16	12	10	1			366			5	21.1	70.0		
۱۶-۱۰-۲۰۰۷	49	17	12	10	1			366			5	23.9	75.0		
۱۷-۱۰-۲۰۰۷	51	15	12	10	1			400			6	21.1	70.0		
۱۸-۱۰-۲۰۰۷	50	16	12	10	1			350			4	18.3	65.0		
۱۹-۱۰-۲۰۰۷	50	16	12	10	1			375			4	18.3	65.0		

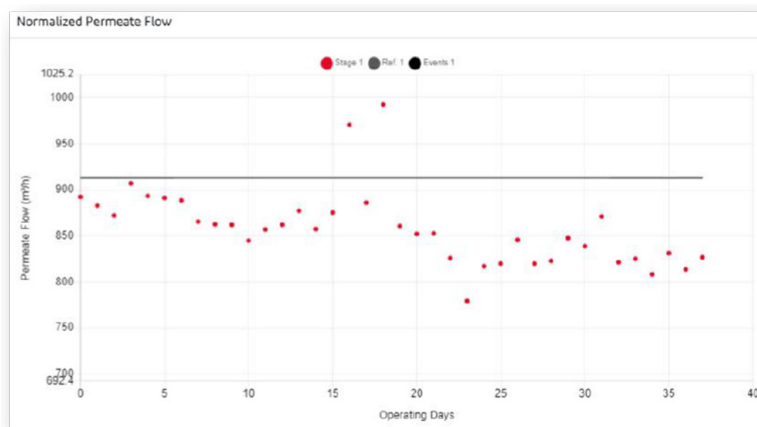
شکل 1. دیتاهای مورد نیاز برای نرم افزار FTNorm

نرم افزار به صورت خودکار محاسبات مربوط به نرمالایز کردن داده‌ها را انجام می‌دهد. مهم‌ترین مزیت نرم‌افزار نشان دادن روند تغییرات پارامترها به صورت نمودار است.

Dow Reverse Osmosis and Nanofiltration Operating Data Normalization								Dow Reverse Osmosis and Nanofiltration Operating Data Normalization							
Plant Identification: Test Train Data								Plant Identification: Test Train Data							
Feed Flow	Days of Operation	Recovery (%)	Differential Pressure	Temperature Correction Factor	Calculated Feed/Brine Avg Conc	Feed/Brine Osmotic Pressure	Permeate Osmotic Pressure	Net Driving Pressure	Normalized Permeate Flow	Normalized Permeate Salt Passage	Normalized Permeate Salt Rejection				
66	3	76%	3	0.890	685	1	0.0	9.5	50	1.4%	98.6%				
66	5	74%	2	0.967	669	1	0.0	9.3	46	1.3%	98.7%				
66	23	77%	3	0.890	767	1	0.0	9.3	52	1.5%	98.5%				
66	33	76%	3	0.817	655	1	0.0	9.4	55	1.2%	98.8%				
66	54	76%	3	0.817	701	1	0.0	9.4	55	1.2%	98.8%				

شکل 2. محاسبات دیتاهای نرمالایز به وسیله نرم افزار

نکته‌ای که در تحلیل و بررسی نمودار و دیتاها باید در نظر داشت این است که تغییرات ناگهانی در روند نمودارها می‌تواند در مرحله اول به دلیل ثبت نادرست دیتا توسط اپراتور باشد و این موضوع باید چک و از درست بودن داده‌ها اطمینان حاصل شود. شکل زیر نمونه‌ای از نمودارهای نرم افزار نرمالایز در خصوص فلو پرمییت است.



شکل 3. نمودار نرمالایز فلو پرمییت

در صورتی که تغییرات پارامترها مطابق شرایط زیر باشد نیاز به اقدام اصلاحی مانند CIP سیستم است.

- کاهش بیشتر از 10 درصد فلو پرمییت نرمالایز نسبت به شرایط مرجع
- کاهش بیشتر از 10 درصد کیفیت پرمییت نرمالایز نسبت به شرایط مرجع
- افزایش بیشتر از 15 درصد افت فشار نرمالایز سیستم نسبت به شرایط مرجع

نکته: در صورتی که هر یک از شرایط فوق در سیستم ایجاد شود می‌تواند نشان‌دهنده فولینگ ممبران‌ها باشد.

3- نتیجه:

روش‌های مانیتورینگ سیستم شامل پایش مستمر پارامترهای عملیاتی ثبت داده‌های روزانه انجام نرمال‌سازی و تحلیل تغییرات عملکردی است. استفاده از این روش‌ها به افزایش عمر ممبران، بهینه‌سازی مصرف انرژی و بهبود کیفیت آب تصفیه شده کمک می‌کند. استفاده از این راستا استفاده از نرم افزار نرمالایز تحلیل داده‌ها، می‌تواند فرآیند نظارت و مدیریت عملکرد سیستم را تسهیل کند.

پیوست:

Table A1: Softened drinking or well water, $\text{SDI} < 2$, peak 3; $\text{NTU} < 0.3$, peak 0.5

Parameters	Online Monitoring (Continuously)	Daily (Data sheet)	Periodically ⁽¹⁾	Alarm & safety system
1. Date & Time of data logging		X		
2. Total operating hours		X		
3. Number of vessels in operation			X	
4. Feed water conductivity	X ⁽²⁾	X		
5. Total hardness		X		X
6. Feed water pH			X	
7. Feed water FI (SDI ₁₅)		X		
8. Feed water temperature	X ⁽³⁾	X		X ⁽³⁾
9. Feed water pressure	X	X		X
10. Feed water chlorine concentration	X ⁽⁴⁾	X ⁽⁴⁾		X ⁽⁴⁾
11. Brine surplus of HSO_3^- ($\geq 0.5 \text{ mg/l}$) *		X		X
12. Feed water individual ion concentration			X ⁽⁵⁾	
13. Brine conductivity		X		
14. Brine pH			X	
15. Pressure drop of each bank		X		X
16. Brine flow rate		X		X
17. Total permeate conductivity	X	X		X
18. Permeate conductivity of each vessel			X ¹⁾	
19. Permeate pressure	X ⁽⁵⁾	X		X ⁽⁵⁾
20. Total permeate flow rate	X	X		X
21. Permeate flow rate for each bank		X		
22. Permeate individual ion concentration			X ⁽⁵⁾	
23. Total recovery ratio		X		
24. Recovery ratio for each bank			X	
25. Normalized salt passage			X	
26. Normalized permeate flow rate			X	

¹⁾ HSO_3^- surplus in brine if raw water is chlorinated

Notes:

- (1) Log these parameters monthly from initial start-up operation. In case of trouble shooting or fluctuating operating conditions, the operating party is requested to check these parameters more frequently, depending on particular situation.
- (2) In case of significant fluctuations
- (3) In case of high fluctuations or heat exchanger systems
- (4) If chlorine is detected in feed water, plant must be stopped immediately and flushed with chlorine-free water.
- (5) In case of fluctuating pressure > 0.5 bar, closed permeate loop or (automatic) valve → risk of water hammer.
- (6) Recommended procedure is water analysis of individual ions, comparing results with projected data. Required typical ions are listed in Table B

Table A2: Drinking or well water, $\text{SDI}_{15} < 3$, peak 4; $\text{NTU} < 0.3$, peak 0.5

Parameters	Online Monitoring (Continuously)	Daily (Data sheet)	Periodically (1)	Alarm & Interlock System
1. Date & Time for data logging		x		
2. Total operating hours		x		
3. Number of vessels in operation		x		
4. Feed water conductivity	x ⁽²⁾	x		
5. Feed water pH	x ⁽³⁾	x		x ⁽³⁾
6. Feed water FI (SDI_{15})		x		
7. Feed water turbidity (NTU)			x	
8. Feed water temperature	x ⁽⁴⁾	x		x ⁽⁴⁾
9. Feed water pressure	x	x		x
10. Feed water chlorine concentration	x ⁽⁵⁾	x ⁽⁵⁾		x ⁽⁵⁾
11. Antiscalant concentration in feed wa-		x ⁽⁶⁾		x
12. Brine surplus of HSO_3^-		x		x ⁽⁵⁾
13. Indiv. ion concentrations feed water			x ⁽⁵⁾	
14. Brine conductivity		x		
15. Brine pH	x ⁽³⁾	x		
16. Pressure drop of each bank		x		x
17. Brine flow rate	x	x		x
18. Total permeate conductivity	x	x		x
19. Permeate conductivity of each vessel			x	
20. Permeate pressure	x ⁽⁷⁾	x		x ⁽⁷⁾
21. Total permeate flow rate	x	x		x
22. Permeate flow rate for each bank		x		
23. Permeate individual ions			x ⁽⁵⁾	
24. Total recovery		x		x
25. Recovery for each bank			x	
26. Normalized salt passage			x	
27. Normalized permeate flow rate			x	

⁷⁾ HSO_3^- - surplus in concentrate ≥ 0.5 ppm in case of chlorinated raw water



Notes:

- (1) Log these parameters monthly from initial start-up of operation. In case of trouble shooting or fluctuating operating conditions, the operating party is requested to check these parameters more frequently, depending on particular situation
- (2) In case of significant fluctuations
- (3) In case of high fluctuations or acid dosing
- (4) In case of high fluctuations or heat exchange system
- (5) If there is any possibility of chlorine content in feed water
- (6) Recommended is water analysis of individual ions, comparing results with projected data. Required typical ions are listed in Table B
- (7) In case of fluctuating pressure > 0.5 bar, closed permeate loop or (automatic) valve → risk of water hammers
- (8) Volumetric recording of daily consumption, divided by total daily feed flow.

Table A3: Surface water/tertiary effluent, Ø SDI < 4, peak 5; Ø NTU < 0.3, peak 1.0

Parameters	Online Monitoring (Continuously)	Daily (Data sheet)	Periodically ⁽¹⁾	Alarm & Interlock System
1. Date & Time for data logging		x		
2. Total operating hours		x		
3. Number of vessels in operation		x		
4. Feed water conductivity	x	x		
5. Feed water pH		x		x
6. Feed water FI (SDI ₁₅)		x		x
7. Feed water turbidity (NTU)	x	x		x
8. Feed water temperature	x	x		x
9. Feed water pressure	x	x		x
10. Feed chlorine concentration	x	x		x
11. Feed antiscalant concentration		x		x
12. Brine surplus of HSO ₃ ⁻ (≥ 0.5 mg/l)		x		x
13. Indiv. ion concentration feed water			x ⁽²⁾	
14. Brine conductivity		x		
15. Brine pH	x	x		
16. Pressure drop of each bank	x	x		x
17. Brine flow rate	x	x		x
18. Total permeate conductivity	x	x		x
19. Permeate conductivity of each vessel			x	
20. Permeate pressure		x		x
21. Total permeate flow rate	x	x		x
22. Permeate flow rate for each bank		x		
23. Indiv. ion concentration permeate			x ⁽²⁾	
24. Total recovery ratio		x		x
25. Recovery ratio for each bank			x	
26. Normalized salt passage			x	
27. Normalized permeate flow rate			x	

²⁾ HSO₃⁻ - surplus in concentrate if raw water is chlorinated

Notes:

- ⁽¹⁾ Log these parameters monthly from initial start-up of operation. For trouble shooting or with fluctuating operating conditions, additional check-ups are required, depending on particular situation
- ⁽²⁾ Recommended procedure is water analysis of individual ions, comparing results with projected data. Required typical ions are listed in Table B

Table B: Typical Water Analysis Items

Items		Feed Water	Permeate
1. Conductivity (25°C)	($\mu\text{S/cm}$)	$x^{(1)}$	x
2. Total dissolved solids	(TDS)	x	x
3. pH (25°C)		x	x
4. Chloride	(Cl^-)	$x^{(1)}$	x
5. Nitrate	(NO_3^-)	x	x
6. Bicarbonate	(HCO_3^-)	$x^{(1)}$	x
7. Sulfate	(SO_4^{2-})	x	x
8. Phosphate	(PO_4^{3-})	x	
9. Fluoride	(F^-)	x	
10. Sodium	(Na^+)	x	x
11. Potassium	(K^+)	x	x
12. Ammonium	(NH_4^+)	x	
13. Calcium	(Ca^{++})	$x^{(1)}$	x
14. Magnesium	(Mg^{++})	$x^{(1)}$	x
15. Strontium	(Sr^{++})	x	
16. Barium	(Ba^{++})	x	
17. Iron as Ion	(Fe^{++})	x	
18. Manganese	(Mn^{++})	x	
19. Silicate	SiO_2	x	x
20. Silicic acid	SiO_2^-	x	x
21. Chemical oxygen demand	COD	x	
22. Biological oxygen demand	BOD	x	
23. Total Organic Carbon	(TOC)	x	x
24. Carbon Dioxide	(CO_2)	x	
25. Hydrogen Sulfide	(H_2S)	x	
26. Temperature	°C	x	

Note:

Above table is for reference only. Selection of required ions for analysis will also depend on feed water quality and required permeate quality.

- ⁽¹⁾ These values constitute the minimum information required for a qualified RO lay-out. Ions not analyzed will not be available for calculation of scaling potentials.

4- منابع

1. fateme bokaei: FilmTec Reverse Osmosis Membranes Technical Manual, Version 16, February 2023.
2. FT-Norm PRO Technical Manual, Version 0 ,2022
- 3.Operation, Maintenance and Handling Manual for Toray membrane elements.