

ارزیابی نسل جدید ممبرین های اسمز معکوس جهت آب لب شور

به علت توسعه ممبرین های اسمز معکوس (RO) جهت آب لب شور ، استفاده از آنها به سرعت افزایش پیدا کرده است . تمامی تولیدکنندگان بزرگ ممبرین اسمز معکوس یک یا چند ممبرین RO مخصوص آب لب شور را تولید نموده اند . این ممبرین ها در ده سال اخیر به دلیل کاهش زیاد قیمت و افزایش بهره وری در جهت نمک زدایی از آب های لب شور زیرزمینی ، انتخاب بسیار خوبی برای منابع آبی اندک محسوب شده اند . نسل اخیر ممبرین های RO برای آب لب شور اصلاحاتی را در زمینه فشار عملیاتی و کاهش هزینه ها جهت تصفیه آب لب شور نشان داده اند . این مقاله دربرگیرنده ی نتایج حاصل از واحد آزمایش صنعتی (پیلوت) انجام شده بر روی این نسل جدید از ممبرین های فشار پایین RO مخصوص آب لب شور جهت نمک زدایی از آب های زیرزمینی ، می باشد . دو مدل ممبرین جدید ، مورد آزمایش قرار گرفتند - مدل ESPA 4 ساخت شرکت Hydranautics واقع در Oceanside , CA و مدل 4040 BL ساخت کارخانه ی صنایع Saehan واقع در کره ی جنوبی . شرکت Hydranautics در امریکا سازنده ی خوبی برای ممبرین است حال آنکه شرکت صنایع Saehan در بازار امریکا حضور رایجی ندارد . همچنین از نسل قدیمی تری از ممبرین (مدل ESPA 2 ساخت شرکت Hydranautics) به طور موازی با نسل جدید ممبرین ها برای فراهم کردن اطلاعاتی جدید جهت مقایسه استفاده شد . این طرح

بخشی از یک برنامه ی تحقیقاتی توسط Desalination Research

و Innovation Partnership است که شامل تأمین آب ناحیه ی جنوبی کالیفرنیا می باشد .

مواد و روش‌ها

شرح منطقه

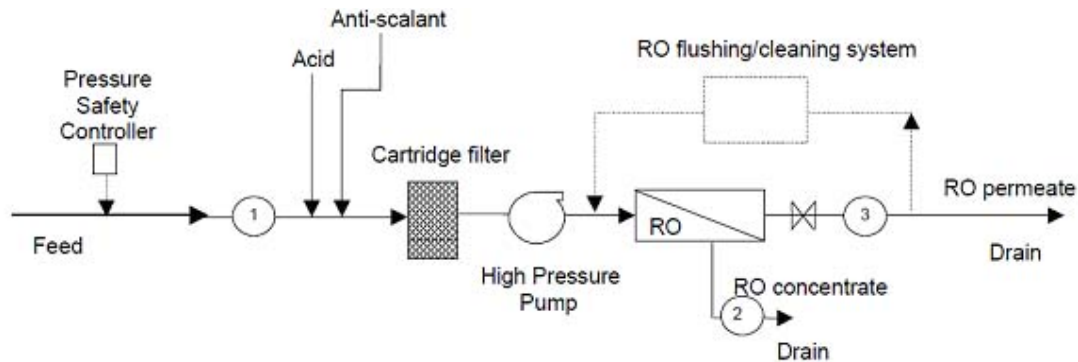
این تحقیق از طریق واحد آزمایش صنعتی در تأسیسات نمک‌زدایی از آب‌های زیرزمینی Richard A. Reynolds واقع در National City , CA انجام پذیرفت . این تأسیسات در مقیاس کامل مالکیت خصوصی داشته و توسط Sweetwater Authority مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد ، و آب زیرزمینی لب شور حاصل از چهار چاه نزدیک به هم را با استفاده از اسمز معکوس تصفیه می‌کند . پیکربندی تأسیسات به‌گونه‌ای دو مرحله‌ای بوده و ظرفیت معمول آن ۴ MGD می‌باشد .

شرح تجهیزات واحد آزمایش صنعتی

در طی این تحقیق در جهت تصفیه آب‌های زیرزمینی لب شور ، دو سیستم آزمایش صنعتی (پایلوت) اسمز معکوس به‌کار گرفته شد . در ابتدا دو رشته ممبرین در یک مسیر از پایلوت قرار گرفت که با مقدار بازیافت ۵۰٪ جهت آب خوراک ، کار می‌کردند . با استفاده از این چیدمان ، ممبرین‌های نسل جدید از دو شرکت مختلف آزمایش شدند . مسیر پایلوت دیگر دارای یک رشته ممبرین بود تا آزمایش مرجع بر روی نسل قدیمی‌تری از ممبرین انجام شود . هر رشته RO دارای دو لوله‌ی تحت فشار سری هستند که هر کدام دارای سه المان ممبرین ۴ در ۴۰ اینچ می‌باشند . بعد از آن پایلوت بزرگ‌تری استفاده شد تا ممبرین‌های انتخاب شده با مقادیر بازیافتی بالاتر در یک ردیف ۱-۱-۲-۲ با شش لوله‌ی تحت فشار مورد آزمایش قرار گیرد .

دو مسیر RO استفاده شده دارای تجهیزات زیر بودند : پمپ فشار قوی ، مجموعه‌ی فیلتر کارتریج و یک سیستم تزریق مواد شیمیایی . به‌علاوه ، این مسیر مجهز به دستگاه‌های اندازه‌گیر درون خطی برای سنجش هدایت الکتریکی ، pH ، درجه حرارت خوراک و یک

ساعت جهت نمایش مدت زمان . یک نمودار نمادین از مجموعه‌ی واحد آزمایش صنعتی (پایلوت) به همراه محل‌های نمونه‌برداری در شکل ۱ گردآوری شده است .



شکل ۱ : نمادی از آزمایش پایلوت به همراه محل‌های نمونه‌برداری (۱ . خوراک ، ۲ . محلول غلیظ شده و ۳ . آب تصفیه شده)

دو کارخانه‌ی سازنده : ممبرین‌های آزمایشی اسمز معکوس از دو شرکت Hydranautics و Saehan تهیه شدند . هر شرکت سازنده جدیدترین و پیشرفته‌ترین ممبرین اسمز معکوس خود را ، که به‌طور ویژه جهت نمک‌زدایی از آب‌های زیرزمینی لب شور طراحی شده بود ، ارائه کرد . همچنین یک ممبرین نسل قدیمی‌تر برای انجام آزمایش مرجع از شرکت Hydranautics تهیه شد . همان‌طور که در بالا ذکر گردید ، سازندگان به‌علت موفقیت و نوآوری در صنعت ممبرین RO ، انتخاب شده بودند . شرح مختصری از هر شرکت سازنده در زیر آورده شده است :

- Hydranautics – در نزدیکی Oceanside , CA واقع شده است ، Hydranautics یک شرکت پیشرو در امر ساخت ممبرین اسمز معکوس می‌باشد و دائماً محصولاتی را برای شهرهای بزرگ در سراسر دنیا تهیه می‌کند . Hydranautics ممبرین‌های RO را برای موارد متنوعی از قبیل فن‌آوری جدید جهت نمک‌زدایی از آب‌های زیرزمینی ، آب‌های سطحی و آب دریا عرضه می‌کند . علاوه‌براین ، Hydranautics

ممبرین‌هایی را برای استفاده در صنایع سبک هم به‌عنوان یک هدف در کاربردهای مصرفی تولید می‌کند .

- شرکت صنعتی Saehan – دفتر مرکزی در شهر سئول در کره قرار داشته و از سال ۱۹۹۴ به‌طور تجاری ممبرین‌های اسمز معکوس را جهت موارد تصفیه آب خانگی و صنعتی در خارج از ایالات متحده تولید می‌کند . علاوه‌براین ، شرکت صنعتی Saehan در سراسر دنیا از قبیل فرانکفورت ، هوچی‌مین ، هونگ کونگ ، نیویورک ، شانگهای و توکیو دارای شعبه است .

طرح آزمایشی

آزمایشاتی در مقیاس پایلوت

معیار استفاده شده برای انتخاب ممبرین‌ها جهت این تحقیق ، ممبرین‌های نسل جدید بودند که جدیدترین ممبرین‌های موجود در بازار یا پیشرفته‌ترین موارد تولید شده توسط سازندگان بودند . فراهم بودن آب زیرزمینی با مقدار TDS در حد آب‌های لب‌شور معیار انتخاب محل آزمایش بود . ممبرین‌های انتخاب شده (ESPA 4 از شرکت Hydranautics و 4040 BL از شرکت Saehan) جدیدترین محصول دو شرکت سهیم در این امر بوده و محل آزمایش به آب زیرزمینی لب‌شور San Diego Formation نزدیک بود . ممبرین قدیمی‌تر استفاده شده ، ESPA 2 از شرکت Hydranautics بود .

واحدهای آزمایش صنعتی RO بالغ بر ۹ ماه در شرایط مختلف ، مورد بهره‌برداری قرار گرفتند . جدول ۱ حاوی شرایط عملیاتی اعمال شده در طی انجام آزمایش پایلوت در هر ماه می‌باشد . باید به این نکته توجه داشت که هر ماه در انجام آزمایش نشان‌دهنده‌ی یک تجربه‌ی مجزا بوده و بنابراین در ابتدا تصمیم گرفته شد که ممبرین‌ها در پایان هر دوره از آزمایش شستشو شوند . نتایج حاصل از آزمایش نشان دادند که رسوب‌گذاری قابل

ملاحظه‌ای در انتهای هر دوره اتفاق نیافتاده است و بنابراین جهت ارزیابی عوامل بر روی رسوب‌گذاری ، شستشو متوقف گردید . برخی مواقع که دوره‌ی آزمایش بیش از یک ماه می‌شد ، سیستم را مدتی خاموش می‌کردند . همان‌طور که نشان داده شده است ، در این تحقیق هر دو ممبرین جدید با شدت نفوذهای ۱۲ ، ۱۴ ، ۱۸ و ۲۰ (gfd) به‌ترتیب در طی ماه‌های ۱ ، ۲ ، ۳ و ۴ مورد بهره‌برداری و ارزیابی قرار گرفتند . در ماه اول فقط ممبرین‌های نسل جدید (ESPA 4 و 4040 BL) آزمایش شدند . در یک تحقیق جدید ، ممبرین قدیمی‌تر (ESPA 2 از شرکت Hydranautics) تحت شرایط عملیاتی مشابه (۱۲ gfd و مقدار بازیافت ۵۰٪) در همان محل مورد بررسی قرار گرفت و اطلاعاتی حاصل گردید . در چهار ماه اول آزمایش ، مقدار بازیافت آب خوراک در ۵۰٪ ثابت نگه‌داشته شد . عملکرد ممبرین‌های نسل جدید پس از چهار ماه اول آزمایش ارزیابی گردید و با عملکرد ممبرین ESPA 2 مقایسه شد . ممبرین جدید 4040 BL از شرکت Saehan برای انجام آزمایشات بیشتر انتخاب گردید ، فشار عملیاتی برای این ممبرین در مقایسه با ESPA 4 کمتر بود ، ولی رسوب‌گذاری در هر دو ممبرین ناچیز بود . بالاخره ، همان‌طور که در جدول ۲-۱ نشان داده شده است ، مقدار بازیافت آب ورودی به سیستم (بر حسب ٪) در طی دوره‌ی پنجم آزمایش ، از ۷۵ درصد به ۹۵ درصد افزایش یافت . مقادیر بازیافت برای سیستم پایلوت با چیدمان ۱-۱-۲-۲-۲-۱-۱-۱ ردیفی به‌دست آمد . به‌جهت نوع چیدمان ، محلول غلیظ شده‌ی حاصل از مرحله‌ی ۱ به‌عنوان خوراک وارد مرحله‌ی ۲ می‌شد . باید به این نکته توجه داشت که برای اطمینان از صحت سرعت جریان متقاطع ، با سازنده‌ی هر المان مشورت گردید و این مقدار برای شدت‌های مختلفی از بازیافت ، ثابت نگه‌داشته شد .

Membrane	Testing Period (weeks)	Flux (gfd)	Recovery (%)
ESPA 4	1 (4 weeks)	12	50
4040 BL	1 (4 weeks)	12	50
ESPA 4	2 (4 weeks)	14	50
4040 BL	2 (4 weeks)	14	50
ESPA 2	2 (4 weeks)	14	50
ESPA 4	3 (4 weeks)	18	50
4040 BL	3 (4 weeks)	18	50
ESPA 2	3 (4 weeks)	18	50
ESPA 4	4 (4 weeks)	20	50
4040 BL	4 (4 weeks)	20	50
ESPA 2	4 (4 weeks)	20	50
4040 BL	5 (4 weeks)	20	75
4040 BL	6 (2 weeks)	21	85
4040 BL	7(4 weeks)	21	90

جدول ۱: جدولی از شرایط عملیاتی واحد آزمایش صنعتی (پایلوت)

جمع‌آوری و تحلیل اطلاعات

اطلاعات عملیاتی حاصل از سیستم پایلوت ، حداقل یکبار در روز توسط مهندس حاضر در محل ثبت گردیده است . مقادیر ثبت شده شامل فشار (خوراک ، محلول غلیظ شده و آب تصفیه شده) ، شدت جریان (آب تصفیه شده و محلول غلیظ شده) ، درجه حرارت آب خوراک و اسیدیته و هدایت الکتریکی (خوراک و آب تصفیه شده) می‌باشند . سپس این اطلاعات توسط رسم چندین نمودار که دربرگیرنده‌ی فشار محرکه‌ی خالص بر حسب زمان ، فشار ممبرین انتقال دهنده (TMP) بر حسب زمان ، شدت نفوذ مخصوص بر حسب زمان هستند ، تحلیل می‌شوند .

کیفیت آب

کیفیت آب به‌طور محدودی آنالیز شده است . این آنالیزها شامل موارد زیر هستند :
 UV254 ، TOC ، آهن کل ، سیلیکا و منگنز کل .

نتایج و تشریح مطالب

مرحله‌ی اول آزمایش (دوره‌های آزمایشی ۱ تا ۴)

در این مرحله از آزمایش ، ممبرین قدیمی‌تر با ممبرین نسل جدید به‌طور نسبی ارزیابی می‌شود . این دوره‌ی آزمایشی چهار ماه طول کشید و شامل بهره‌برداری از ممبرین ESPA 4 و 4040 BL در FWR برابر با ۵۰٪ و شدت نفوذهای ۱۲، ۱۴، ۱۸ و ۲۰ gfd بود . ممبرین ESPA 2 در FWR برابر با ۵۰٪ و شدت نفوذهای ۱۴، ۱۸ و ۲۰ gfd مورد بهره‌برداری قرار گرفت . جدول ۲ خلاصه‌ای از نتایج حاصل از این مرحله‌ی آزمایش را نشان می‌دهد .

Testing Period	Target Flux	FWR	Membrane	Avg TMP (psi)	Avg Specific Flux (25deg) (gfd/psi)	Salt Rejection (%)
1	12 gfd	50%	ESPA 2	89	0.21	98.2
			ESPA 4	69	0.28	96.6
			4040 BL	64	0.32	97.0
2	14 gfd	50%	ESPA 2	97	0.21	98.3
			ESPA 4	77	0.28	96.8
			4040 BL	71	0.32	97.1
3	18 gfd	50%	ESPA 2	118	0.21	98.5
			ESPA 4	97	0.26	97.7
			4040 BL	88	0.30	97.8
4	20 gfd	50%	ESPA 2	131	0.20	98.6
			ESPA 4	109	0.25	98.0
			4040 BL	104	0.27	97.5

جدول ۲ : نتایج حاصل از مرحله‌ی اول آزمایش

در جدول فوق می‌توان مشاهده کرد که مقدار TMP برای ESPA 2 در تمامی شرایط عملیاتی بیش‌ترین بوده و پس از آن ممبرین‌های ESPA 4 و 4040 BL قرار دارند . به‌همان نسبت ، شدت نفوذ مخصوص برای ممبرین ESPA 2 کمترین مقدار را داشته و پس از آن ممبرین‌های ESPA 4 و 4040 BL قرار دارند . همچنین باید توجه داشت که در تمامی

شرایط 2 ESPA بیشترین مقدار را داشته و پس از آن ممبرین‌های 4 ESPA و 4040 BL قرار دارند . در چهارمین دوره‌ی آزمایش ، مقدار دفع ممبرین 4 ESPA بیش‌تر از 4040 BL می‌باشد .

به‌علت این‌که هدف از این تحقیق ، پیدا کردن ممبرین‌های اقتصادی‌تر از میان ممبرین‌های متداول موجود می‌باشد ، باید به اطلاعات فوق به‌عنوان راهنما توجه نمود . مقدار TMP عامل مهمی در مورد هزینه‌های بهره‌برداری از ممبرین می‌باشد . همچنین برای تأسیسات نمک‌زدایی از آب لب شور با TDS در حدود ۱۰۰ mg/L ، قابل قبول بوده و در حالتی که باید با استفاده از ممبرین از آب دریا نمک‌زدایی نمود ، بهره‌برداری از ممبرین‌های با مقدار دفع بسیار بالا توجیه اقتصادی ندارد . بنابراین شیوه‌ی جدید در تصفیه آب لب شور ، افزایش حجم تصفیه در ممبرین می‌باشد ، اگرچه قابلیت‌های دفع مقداری کاهش می‌یابد . این مطلب به‌روشنی از طریق اطلاعات مربوط به سه ممبرین آزمایش شده قابل مشاهده است . ممبرین قدیمی‌تر ظرفیت دفع بالاتری دارد اما فشار عملیاتی زیاد در این ممبرین باعث افزایش هزینه‌های بهره‌برداری می‌شود ، این در حالی است که ممبرین‌های نسل جدید دارای مقدار دفع کمتری هستند اما فشار عملیاتی در آن‌ها به‌طور اساسی کمتر می‌باشد (بین ۱۷ تا ۲۷ درصد بالای شرایط عملیاتی آزمایشی) .

همچنین می‌توان مشاهده نمود که بین دو ممبرین نسل جدید ، مقدار TMP برای ممبرین Saehan 4040 BL کمتر از ممبرین Hydranautics ESPA 4 می‌باشد . در نتیجه شدت نفوذ مخصوص برای ممبرین 4040 BL زیادترین مقدار است . همچنین مقدار دفع در تمامی دوره‌های آزمایشی برای ممبرین 4040 BL بیش‌تر از ممبرین 4 ESPA می‌باشد به‌جز وقتی‌که شدت نفوذ عملیاتی برابر با ۲۰ gfd است . مقدار TMP برای ممبرین ESPA 4 به‌اندازه‌ی ۵ تا ۷ درصد بیش‌تر از ممبرین 4040 BL می‌باشد . این اختلاف قابل

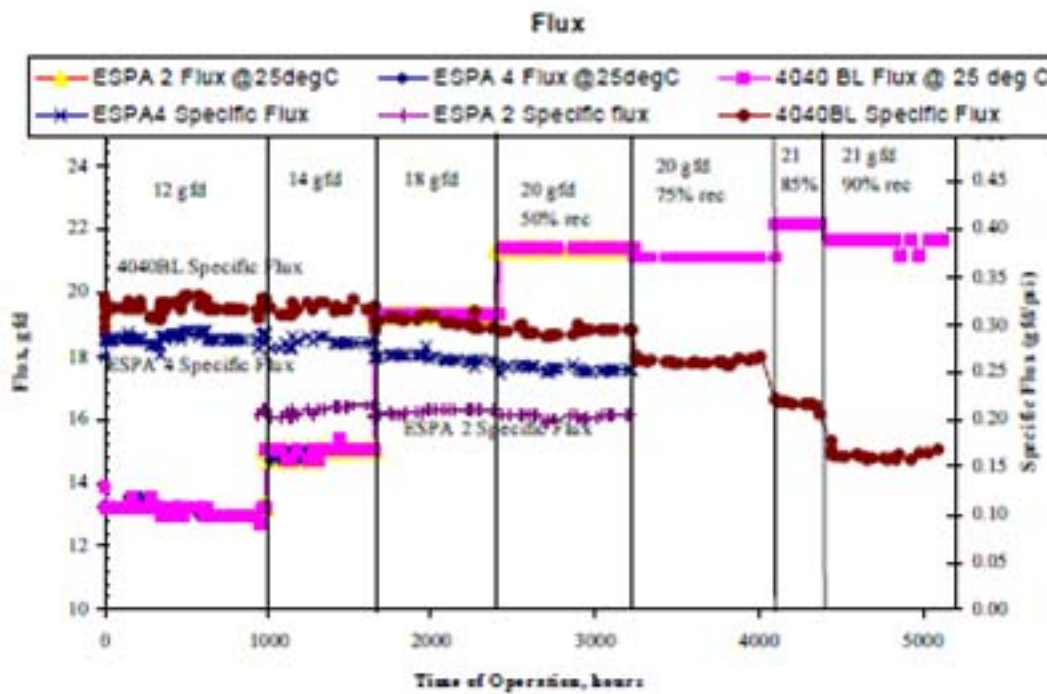
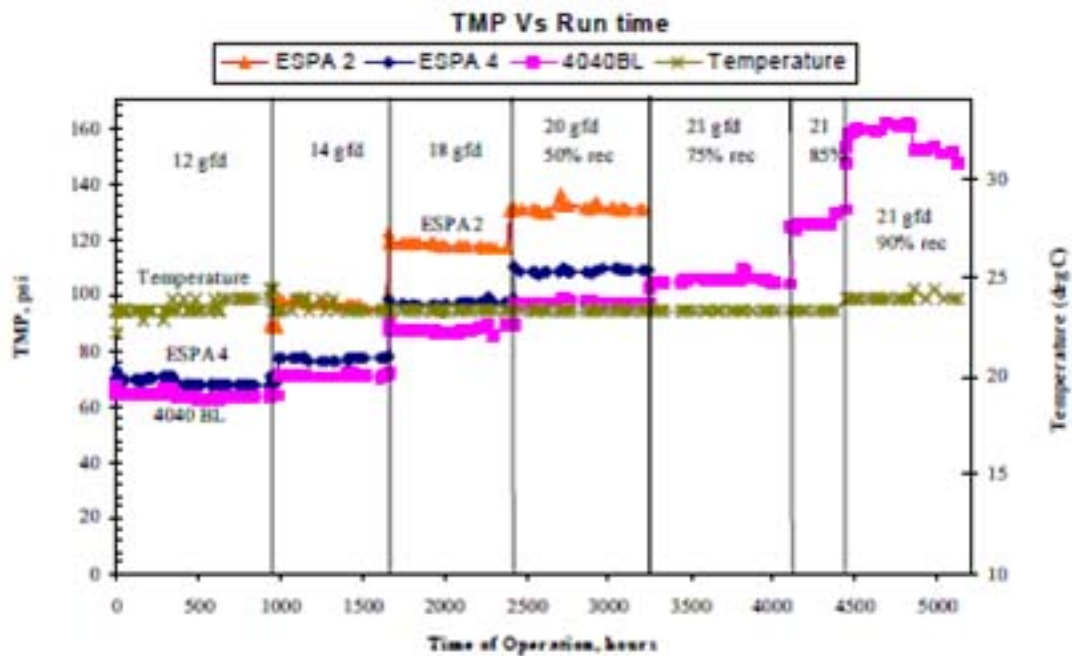
ملاحظه نیست و می‌توان آن را در محدوده‌ی شدت نفوذهای آزمایش شده ثابت در نظر گرفت آن‌چنان‌که از این مطلب می‌توان برای انتخاب ممبرین 4040 BL جهت مرحله‌ی دوم آزمایش استفاده نمود .

در طی چهار دوره آزمایش ، افت شدت نفوذ در ممبرین کم‌ترین مقدار را دارد ، همان‌طوری که از خلاصه‌ی نمودارهای مقایسه‌ای موجود در شکل ۱ می‌توان مشاهده نمود . این امر نشان می‌دهد که مقدار رسوب‌گذاری ، در صورت وجود داشتن ، ناچیز است .

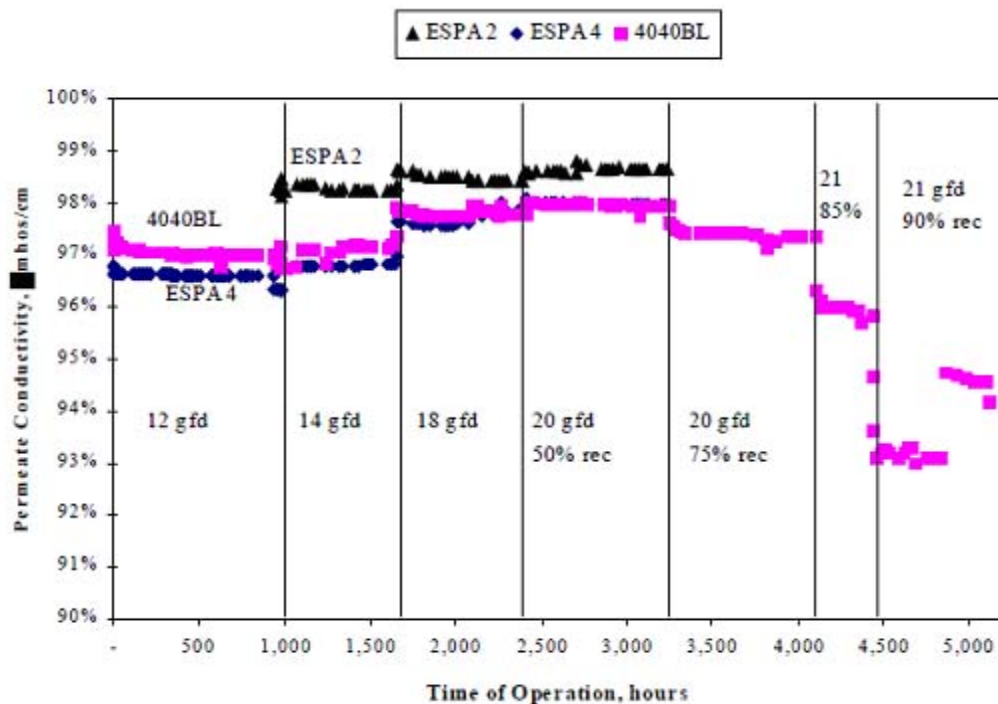
مرحله‌ی دوم آزمایش

در این مرحله از آزمایش ، ممبرین Saehan 4040 BL با مقدار بازیافت‌های زیاده‌تر مورد بهره‌برداری قرار گرفت تا اطلاعات مربوط به عملکرد این ممبرین ، در شرایط عملیاتی مشکل‌تر جمع‌آوری شود . در این مرحله شدت نفوذ در حدود ۲۰ gfd ثابت نگه‌داشته شد و مقدار بازیافت به‌تدریج از ۷۵ به ۹۵ درصد افزایش یافت .

شکل ۲ مقدار TMP و مسیر تحول شدت نفوذ مخصوص را در طی ۵۰۰۰ ساعت آزمایش ، نشان می‌دهد (شامل مرحله ۱ و ۲) . از این نمودار می‌توان مشاهده نمود که تحت هر شرایط آزمایشی ، مقدار TMP حداقل افزایش را داشته و در طول کل دوره‌های آزمایشی ، ممبرین دچار رسوب‌گذاری قابل ملاحظه‌ای نشده‌اند .



شکل ۲ : نتایج مربوط به TMP ، شدت نفوذ و شدت نفوذ مخصوص



شکل ۳ : نتایج مربوط به دفع نمک

در طی مرحله‌ی دوم آزمایش ، ممبرین در حالت بهره‌برداری نگه داشته می‌شود تا مقدار بازیافت به ۹۰٪ برسد . به‌هرحال دیده می‌شود که در این مقدار بازیافت بالا ، مقدار دفع نمک دچار کاهش شده است . تغییر مقدار دفع در بازیافت ۹۰٪ ، به‌علت تغییرات ناگهانی در هدایت الکتریکی آب خوراک به جهت انجام بهره‌برداری مناسب می‌باشد . این‌چنین تغییراتی در مقدار دفع نمک در شرایط عملیاتی سخت ، در شکل ۳ نشان داده شده است .

نتیجه‌گیری

- ممبرین‌های نسل جدید ، ممبرین‌های قدیمی‌تر را از نظر فشار عملیاتی ارتقاء داده‌اند ، که این امر می‌تواند منجر به صرفه‌جویی در هزینه‌ها شود . به‌هرحال ، ظرفیت‌های دفع نمک برای این ممبرین‌ها اندکی کمتر است .

- آزمایش‌های گسترده بر روی ممبرین جدید Saehan 4040 BL نشان می‌دهد که این ممبرین می‌تواند با شدت نفوذ زیاد (در حدود ۲۰ gfd) و بازیافت زیاد (۸۵ تا ۹۰ درصد) مورد بهره‌برداری قرار گیرد . در این شرایط عملیاتی هیچ‌گونه افتی در شدت نفوذ مشاهده نشد زیرا در حین انجام آزمایشات محدود ، رسوب‌گذاری و جرم‌گذاری روی نداد .
- برای این ممبرین‌های نسل جدید آزمایش‌های طولانی مدت بیش‌تری توصیه می‌شود .