

الحمد لله الذي
خلقنا من
الحمم



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی تبدیل انرژی

بررسی تجربی انتقال حرارت دوفازی در مخزن تحت خلاء به منظور دست یابی به سیستم بهبودیافته شیرین سازی آب شور

نگارنده: محمدتقی عابدیان

اساتید راهنما

دکتر محسن نظری

دکتر محمد محسن شاهمردان

اسفند ۱۳۹۹

شماره: ۲۷/۱۷۹۹۷۲
تاریخ: ۲۲/۳/۱۴۰۰

باسمه تعالی



فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای محمد تقی عابدیان با شماره دانشجویی ۹۶۱۰۲۳۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان بررسی تجربی انتقال حرارت دوفازی در مخزن تحت خلاء به منظور دست یابی به سیستم بهبود یافته شیرین سازی آب شور که در تاریخ ۹۹/۱۲/۲۷ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

☐ الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	☐ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸-۱۸/۹۹
☐ ج) درجه خوب: نمره ۱۶-۱۷/۹۹	☐ د) درجه متوسط: نمره ۱۴-۱۵/۹۹
☐ ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد	
☐ نظری	☒ عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر محسن نظری	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر محمدحسن شاه مردان	استاد	
۳- استاد مشاور	-		
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر محمد ضامن	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر احمد نظری	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر علی جباری مقدم	دانشیار	۲۷ اسفند ۱۳۹۹ علی جباری مقدم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر مهدی گردویی
تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تقدیم اثر

ماحصل آموختہ ہایم را تقدیم می کنم بہ آنان کہ مہر آسمانی شان آرام بخش

آلام زمینی ام است

بہ استوارترین تکیہ گاہم، دستان پر مہر پدرم

بہ سبزترین نگاہ زندگیم، چشمان سبز مادرم

تشکر و قدردانی

در اینجا لازم می‌دانم از همه کسانی که بنده را در امر انجام این پایان نامه یاری نموده‌اند

به خصوص جناب آقای دکتر محسن نظری و جناب آقای دکتر محمد محسن شاهمردان که

همواره از راهنمایی و مشاوره‌های آن‌ها بهره‌مند بوده‌ام تشکر و قدردانی نمایم.

تعمدنامه

اینجانب محمدتقی عابدیان دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی دانشکده مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی تجربی انتقال حرارت دوفازی در مخزن تحت خلاء به منظور دست یابی به سیستم بهبودیافته شیرین سازی آب شور تحت راهنمایی آقایان دکتر محسن نظری و دکتر محمدمحسن شاهمردان متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « **Shahrood University of Technology** » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .



۹۹/۱۲/۲۷

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

یکی از بهترین روش های شیرین سازی آب در مقیاس کوچک استفاده از روش تقطیر چند اثره است. در این روش آب در قسمت اواپراتور و در محفظه خلاء در دمایی پایین تر از نقطه جوش خود بخار می شود و در قسمت کندانسور، بخار حاصل از تبخیر به آب شیرین مصرفی تبدیل می شود.

از آنجا که این دستگاه ها تاکنون بیشتر برای مقیاس بزرگ (بیشتر از ۱۰۰۰ مترمکعب در روز) طراحی و ساخته شده اند، برای طراحی بهینه در مقیاس کوچک (۱ تا ۱۰۰ مترمکعب در روز) با کمبود اطلاعات مواجه هستیم و تحقیقات کمی در این زمینه صورت گرفته است. مخصوصاً در زمینه مبدل های فالینگ فیلم در دبی های پایین (رینولدزهای پاششی کوچک) تحقیقات تجربی و تحلیلی بسیار کمی موجود است. با توجه به این که روش تقطیر چند اثره شامل یک سیکل به هم پیوسته از مرحله اول تا کندانسور است، طراحی و ساخت دستگاه در مقیاس کوچک پراهمیت و حساس است. مهم ترین نکته تخمین ضریب انتقال حرارت فالینگ فیلم و بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر آن می باشد. از این رو برای طراحی یک سیستم آب شیرین کن چند اثره (MED) نیاز به دانستن ضریب انتقال حرارت (فالینگ فیلم) در شرایط کاری متفاوت است.

لذا برای طراحی MED در مقیاس کوچک نیاز به یک بررسی تجربی دقیق بر روی مبدل های فالینگ فیلم با نرخ پاشش جریان کم در شرایط کاری متفاوت است، تا بتواند نیاز طراحی MED در مقیاس کوچک را تأمین کند. از این رو در این پژوهش تلاش شده است با ساخت ست آپ آزمایشگاهی بستر مناسبی فراهم شود تا شرایط دستگاه آب شیرین کن MED در مقیاس کوچک، به صورت تجربی مورد آزمایش قرار بگیرد. در این پژوهش اثرات پارامترهایی نظیر دمای آب پیش گرم، دبی پاششی فالینگ فیلم و شار حرارتی اعمالی بر ضریب انتقال حرارت جابجایی فالینگ فیلم مورد مطالعه قرار گرفته است. از جمله نتایجی که پس از انجام آزمایش های تجربی به دست می آید این است که با

افزایش دبی پاششی، ضریب انتقال حرارت فالینگ فیلم افزایش می‌یابد همچنین تغییر دمای آب پیش گرم تأثیری بر افزایش و یا کاهش ضریب انتقال حرارت ندارد. در انتها نتایج پژوهش با روابط تجربی مقایسه می‌شود.

کلمات کلیدی: آب شیرین‌کن، نمک زدایی، روش تقطیر چند اثره، فالینگ فیلم، ضریب انتقال

حرارت جابجایی، عدد ناسلت

فهرست مطالب

ج	فهرست جداول
د	فهرست اشکال
و	فهرست علائم
۱	فصل ۱ : مقدمه
۲	۱-۱ مقدمه
۲	۲-۱ میزان آب های کره زمین
۳	۳-۱ عوامل کمبود آب شیرین
۴	۱-۳-۱ توزیع محدود و نامتعادل منابع آب شیرین
۴	۲-۳-۱ افزایش جمعیت
۶	۳-۳-۱ آلودگی منابع آب
۶	۴-۱ چاره چیست؟
۷	۵-۱ ضرورت شیرین سازی آب
۸	۶-۱ نمک زدایی چیست؟
۹	۷-۱ دسته بندی آب از لحاظ غلظت مواد محلول
۱۱	۸-۱ ترکیبات آب دریا و آب رودخانه
۱۴	۹-۱ انواع روش های نمک زدایی
۱۵	۱-۹-۱ نمک زدایی تکفازی
۲۲	۲-۹-۱ نمک زدایی دو فازی
۲۴	۳-۹-۱ نمک زدایی به روش تقطیر فلش چند مرحله ای
۲۶	۴-۹-۱ نمک زدایی به روش تقطیر چند اثره
۲۹	۱۰-۱ مقایسه روش مختلف نمک زدایی
۳۰	۱-۱۰-۱ کیفیت آب ورودی
۳۰	۲-۱۰-۱ ویژگی های کارخانه
۳۲	۳-۱۰-۱ دفع پسماند آب شیرینکن ها و فرایند تخلیه مایع به میزان صفر
۳۳	۴-۱۰-۱ میزان مصرف انرژی
۳۷	فصل ۲ : مروری بر کار های گذشته
۳۸	۱-۲ تاریخچه مطالعات شیرین سازی آب
۵۶	۲-۲ تاریخچه مطالعات نوع جریان و محاسبات انتقال حرارت در جریان فالینگ فیلم
۶۰	۳-۲ نوآوری پژوهش
۶۳	فصل ۳ : روش تحقیق و اندازه گیری و نحوه انجام آزمایش
۶۷	۱-۳ پیش گرم کن
۷۲	۲-۳ اواپراتور

۷۴	۳-۳ کندانسور
۷۵	۴-۳ دستگاه ثبت داده ها
۷۷	۵-۳ منبع تغذیه
۷۸	۶-۳ تحلیل عدم قطعیت
۷۹	۷-۳ نحوه انجام آزمایش
۸۳	فصل ۴ : معادلات حاکم و نتایج
۸۴	۱-۴ معادلات حاکم بخش های مختلف
۸۴	۱-۱-۴ پیش گرم کن
۸۵	۲-۱-۴ کندانسور
۸۷	۳-۱-۴ اواپراتور
۸۹	۲-۴ تشکیل رسوب در اواپراتور
۹۰	۳-۴ پدیده جوشش در اواپراتور
۹۳	فصل ۵ نتیجه گیری
۹۴	۱-۵ اعداد بدون بعد
۹۴	۲-۵ ثبت داده ها و تجزیه و تحلیل آنها
۹۸	۱-۲-۵ تاثیر دبی آب ورودی بر نتایج تست
۱۰۰	۲-۲-۵ تاثیر دمای آب پیش گرم بر نتایج تست
۱۰۲	۳-۵ تاثیر تغییرات شار بر ضریب انتقال حرارت جابجایی
۱۰۳	۴-۵ اعتبار سنجی تست ها
۱۰۵	فصل ۶ پیوست ها
۱۰۶	پیوست الف) نتایج تست ها در حالت های مختلف
۱۱۵	پیوست ب) تست آنالیز آب
۱۱۷	پیوست ج) نتایج تست وسکوزیته و تنش برشی
۱۱۹	پیوست ج) سند کالیبراسیون سنسور ها
۱۲۲	پیوست د) تحلیل عدم قطعیت و روش فاصله اطمینان
۱۲۳	۱-۶ تعاریف
۱۲۳	۲-۶ عدم قطعیت
۱۲۴	۱-۲-۶ اندازه گیری عدم قطعیت
۱۲۶	۳-۶ روش فاصله اطمینان
۱۲۸	فصل ۷ مراجع

فهرست جداول

جدول ۱-۱ توزیع منابع آبی کره زمین [۲]	۳
جدول ۱-۱ طبقه بندی منابع آبی کره زمین براساس میزان شوری [۱]	۱۰
جدول ۲-۱ اجزای تشکیل دهنده آب استاندارد دریا [۱]	۱۱
جدول ۳-۱ ترکیبات آب رودخانه و آب دریا [۱]	۱۲
جدول ۴-۱ خصوصیات ترمودینامیکی آب استاندارد دریا [۱]	۱۳
جدول ۵-۱ هزینه شیرین سازی آب در فرایند های حرارتی [۱]	۳۱
جدول ۶-۱ هزینه شیرین سازی آب در فرایند های غشایی [۲]	۳۱
جدول ۷-۱ مصرف انرژی و میانگین هزینه تولید آب در فرایند های شیرین سازی در مقیاس بزرگ [۲]	۳۳
جدول ۸-۱ میانگین هزینه تولید آب در فرایند های اصلی نمک زدایی [۲]	۳۴
جدول ۱-۵ اعداد بی بعد مهم در پژوهش	۹۴
جدول ۱-۶ حالت شار ۱۸ کیلووات بر متر مربع و دبی ۴ لیتر بر دقیقه	۱۰۷
جدول ۲-۶ حالت شار ۱۸ کیلووات بر متر مربع و دبی ۶ لیتر بر دقیقه	۱۰۸
جدول ۳-۶ حالت شار ۱۸ کیلووات بر متر مربع و دبی ۸ لیتر بر دقیقه	۱۰۹
جدول ۴-۶ حالت شار ۱۸ کیلووات بر متر مربع و دبی ۱۰ لیتر بر دقیقه	۱۱۰
جدول ۵-۶ حالت شار ۲۵ کیلووات بر متر مربع و دبی ۴ لیتر بر دقیقه	۱۱۱
جدول ۶-۶ حالت شار ۲۵ کیلووات بر متر مربع و دبی ۶ لیتر بر دقیقه	۱۱۲
جدول ۷-۶ حالت شار ۲۵ کیلووات بر متر مربع و دبی ۸ لیتر بر دقیقه	۱۱۳
جدول ۸-۶ حالت شار ۲۵ کیلووات بر متر مربع و دبی ۱۰ لیتر بر دقیقه	۱۱۴

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ رشد جمعیت در ۲۰۰ سال گذشته [۲] ----- ۵
- شکل ۲-۱ شماتیک دستگاه آب شیرین کن [۱] ----- ۹
- شکل ۳-۱ شماتیک پدیده اسمز و اسمز معکوس [۲] ----- ۱۷
- شکل ۴-۱ اساس فرایند اسمز معکوس [۲] ----- ۱۸
- شکل ۵-۱ شماتیک روش الکترودیالیز [۲] ----- ۲۰
- شکل ۶-۱ شماتیک یک کارخانه تقطیر فلش چند مرحله ای [۲] ----- ۲۵
- شکل ۷-۱ شماتیک یک کارخانه تقطیر چند اثره [۲] ----- ۲۸
- شکل ۸-۱ میزان استفاده از روش های مختلف نمک زدایی [۱] ----- ۲۹
- شکل ۱-۳ نمای کلی ستاپ آزمایشگاهی ----- ۶۶
- شکل ۲-۳ شماتیک دستگاه آزمایش ----- ۶۷
- شکل ۳-۳ مجموعه مخزن و المنت الف) المنت در خارج آب ----- ۶۸
- شکل ۴-۳ الف) نمایشگر ب) مجموعه کنترلر مدل E5CC ----- ۶۹
- شکل ۵-۳ رله سه کنتاکت مدل 60.13 ----- ۶۹
- شکل ۶-۳ پمپ آب شور مدل PM45 با توان نیم اسب ----- ۷۰
- شکل ۷-۳ روتامتر شیشه ای ----- ۷۱
- شکل ۸-۳ اتصال پلی آمید و سنسور مقاومتی ----- ۷۱
- شکل ۹-۳ انواع مختلف نازل ها ----- ۷۲
- شکل ۱۰-۳ نازل متمرکز ----- ۷۲
- شکل ۱۱-۳ الف) محفظه اواپراتور ب) محفظه کندانسور ----- ۷۴
- شکل ۱۲-۳ الف) گیج فشار BETA ب) پمپ و کیوم مدل 90066 ----- ۷۵
- شکل ۱۳-۳ دستگاه دیتالاگر ----- ۷۶
- شکل ۱۴-۳ وضعیت قرارگیری ترموکوپل ها داخل لوله ----- ۷۶
- شکل ۱۵-۳ الف) منبع تغذیه سه فاز ب) دستگاه ترانس کاهنده ----- ۷۷
- شکل ۱-۴ شماتیک اواپراتور ----- ۸۷
- شکل ۲-۴ شماتیک مقاومت های حرارتی ----- ۸۸
- شکل ۳-۴ منحنی رژیم های مختلف جوشش [۵۲] ----- ۹۱
- شکل ۱-۵ تعداد سنسور ها داخل لوله های اول، دوم و سوم اواپراتور و موقعیت دقیق آنها ----- ۹۶
- شکل ۱-۶ تست آنالیز آب ورودی به دستگاه ----- ۱۱۶

- شکل ۲-۶ تغییرات وسکوزیته و تنش برشی آب ورودی به دستگاه در دماهای مختلف ----- ۱۱۸
- شکل ۳-۶ گواهی کالیبراسیون سنسور نوع K ----- ۱۲۰
- شکل ۴-۶ گواهی کالیبراسیون سنسور PT100 ----- ۱۲۱

فهرست علائم

علائم لاتین

m^2	A	مساحت لوله
$J/Kg.K$	C_p	گرمای ویژه
m	d	قطر لوله
m / s^2	g	شتاب گرانش
$W/m^2.k$	h	ضریب انتقال حرارت جابجایی
KJ / Kg	h_f	آنتالپی مایع
KJ / Kg	h_g	آنتالپی گاز
A	I	شدت جریان الکتریکی
J/Kg	h_{fg}	گرمای نهان تبخیر
$W/m.K$	K	رسانش حرارتی
m	L	طول لوله
Lit/min	Q	دبی حجمی
kg/s	$\dot{m}$	دبی جرمی
بدون بعد	Nu	عدد ناسلت
بدون بعد	Pr	عدد پرانتل
bar	P	فشار
KW/m^2	q''	شار حرارتی
KW	Q_E	توان حرارتی
بدون بعد	Re	عدد رینولدز
$^{\circ}C$	T	دما
m/s	u	سرعت
volt	V	پتانسیل الکتریکی
m^3 / Kg	v_{fg}	اختلاف حجم مخصوص

علائم یونانی

Kg/m^3	ρ	چگالی
$N.s/m^2$	μ	لزجت دینامیکی
m^2/s	ϑ	لزجت سینماتیکی
m^2/s	α	ضریب نفوذ حرارتی
$Kg/m.s$	Γ	شار جرمی
N/m	σ	کشش سطحی
m	δ	ضخامت فیلم مایع

فصل ۱: مقدمه

۱-۱ مقدمه

شاید اغراق نباشد اگر بگوییم آب یعنی زندگی. هر روز انسان فعالیت های زیادی را انجام می دهد که مستقیم یا غیرمستقیم با استفاده از آب انجام می گیرد. آب در تمام فعالیت های صنعتی، کشاورزی و مصارف خانگی مورد نیاز است. از این رو اهمیت وجود آب شیرین در زندگی بشر بر کسی پوشیده نیست.

میزان مصرف سرانه آب در کشور های مختلف متفاوت است. بنا بر گزارشات سازمان جهانی بهداشت (WHO)^۱ مصرف سرانه متوسط آب در ایالات متحده آمریکا به میزان حداکثر ۴۰۰ لیتر در روز می رسد، در حالی که این مقدار در سایر کشورهای غربی که اقداماتی برای کاهش تقاضای آب شیرین انجام داده اند، به عدد ۱۵۰ لیتر در روز کاهش می یابد. در مقابل در برخی از کشورهای آفریقایی که کمبود جدی آب وجود دارد، مصرف سرانه آب شیرین در محدوده ۲۰ لیتر در روز قرار دارد. طبق گزارشات این سازمان کمترین میزان آب مورد نیاز برای زنده ماندن ۱۵-۲۰ لیتر در روز برای هر نفر توصیه می شود. [۱] این میزان فقط قادر است که نیازهای اساسی مانند نوشیدن، تهیه غذا و بهداشت شخصی را تضمین کند. برای تأمین نیازهای فراتر از نیازهای فردی، مانند مصارف بیمارستانی، مدارس، زیرساخت های اساسی و غیره، این حداقل مقدار باید به میزان قابل توجه ۱۵۰ لیتر در روز برای هر نفر افزایش یابد.

۱-۲ میزان آب های کره زمین

آب یکی از فراوان ترین عناصر موجود در زمین است. برآورد مقدار کل آب رقمی در حدود $10^9 \times 1/4$ کیلومتر مکعب می باشد. این مقدار آب ۷۰٪ از مساحت کره زمین را پوشش می دهد. آب های دریا حدود ۹۷/۵٪ از کل آب موجود است که درصد نمک در آن ها بالا است. ۲/۵٪ باقی مانده (یعنی

^۱ World Health organization

^۷ $10^3 \times 3/5$ کیلومتر مکعب) از آب های زیرزمینی و سطحی تشکیل می شود که به آب ها آب شیرین گفته می شود.

در حدود ۸۰٪ از آب های شیرین به صورت منجمد در یخچال های طبیعی است و حدود ۲۰٪ از آن به صورت آب های زیرزمینی است که اکثراً در اعماق ژرف زمین اند و دسترسی به آنها بسیار مشکل است و تنها کمتر از ۵٪ از کل مقدار آب های شیرین موجود کره زمین در دریاچه ها، رودخانه ها و سفره های زیرزمینی یافت می شود. در جدول ۱-۱ خلاصه ای از توزیع منابع مختلف آب در سراسر جهان آورده شده است.

جدول ۱-۱ توزیع منابع آبی کره زمین [۲]

منابع	حجم (m^3)	درصد از کل	درصد از آب شیرین
آب اتمسفری	۱۲۹۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۱
یخچال های طبیعی	۲۴	۱/۷۲	۶۸/۷
یخ های زمین	۳۰۰۰۰۰	۰/۰۲۱	۰/۸۶
رودخانه ها	۲۱۲۰	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۶
دریاچه ها	۱۷۶۴۰۰	۰/۰۱۳	۰/۲۶
مرداب ها	۱۱۴۷۰	۰/۰۰۰۸	۰/۰۳
خاک های مرطوب	۱۶۵۰۰	۰/۰۰۰۱۲	۰/۰۵
سفره های زیرزمینی	۱۰۵۳۰۰۰۰	۰/۷۵	۳۰/۱
سنگ کره	۲۳۴۰۰۰۰۰	۱/۶۸	
اقیانوس ها	۱۳۳۸۰۰۰۰۰۰	۹۵/۸۱	

۱-۳ عوامل کمبود آب شیرین

دریاچه ها، رودخانه ها و آب های زیرزمینی سه منبع مهم تأمین آب شیرین هستند. در مقیاس جهانی آلودگی منابع آبی توسط انسان نخستین علت کمبود آب شیرین است. یکی از بزرگترین

معضل ها آلودگی دریاچه ها با پسماندهای صنعتی و فاضلاب های مسکونی است. همچنین در بیشتر مناطق جهان، سلامت سیستم های رودخانه ای با افزایش بی رویه مصرف و خطر آلودگی تهدید می- شود. اغلب رودخانه ها فصلی هستند و دیگر قادر به تهیه حجم مورد نیاز آب نیستند. با به وجود آمدن سیستم پمپاژ (از آب های زیرزمینی) و لوله کشی (در مسافت های طولانی) سطح آب سفره های زیرزمینی به شدت افت کرده و آب مصرف شده به سختی قابل بازگردانی است. این امر در بسیاری موارد موجب بدمزگی و شورمزگی آب، ایجاد غلظت های بسیار بالا و خطرناک مواد معدنی و در نتیجه مشکلات بهداشتی می شود. در ادامه با سه علت مهم و کلیدی کمبود آب شیرین آشنا می- شویم.

۱-۳-۱ توزیع محدود و نامتعادل منابع آب شیرین

همانطور که گفته شد تنها کمتر از ۰/۵ درصد از کل مقدار آب های شیرین موجود کره زمین در دریاچه ها، رودخانه ها و سفره های زیرزمینی یافت می شود. اعتقاد بر این است که همین مقدار برای ادامه حیات بر روی زمین کافی باشد ولی متأسفانه این مقدار آب به طور مساوی در زمین توزیع نشده است. برای مثال کشور کانادا یک دهم آب شیرین دنیا را در اختیار دارد ولی جمعیت آن کمتر از یک صدم جمعیت دنیا است.

دسترسی محلی به آب شیرین به سطح بارندگی بستگی دارد. به نحوی که در مناطقی از زمین با میزان بارندگی زیاد، آب شیرین به وفور یافت می شود و برعکس در زمین های خشکی که بارندگی کم است، آب شیرین نیز کم است. چرخه طبیعی آب باعث می شود زمین مانند یک سیستم بسته ی خودکفا عمل کند و مقدار کل آب در آن با گذشت زمان ثابت باشد.

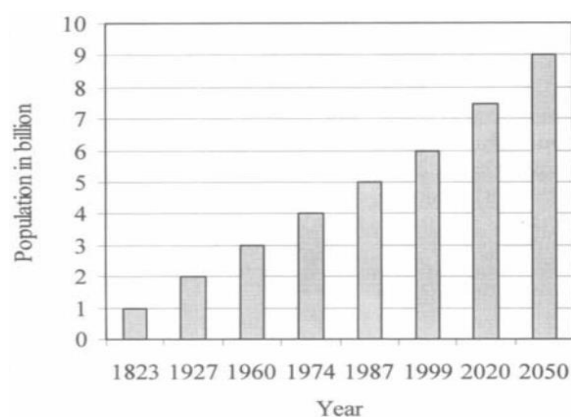
۱-۳-۲ افزایش جمعیت

عوامل مختلفی وجود دارد که به طور مداوم در مصرف آب شیرین جهان تأثیر می گذارند، از جمله

مهم‌ترین آن‌ها افزایش جمعیت جهان بخاطر بهبود کلی کیفیت زندگی و افزایش سطح بهداشت است. میزان منابع آب شیرین از زمان آغاز حیات روی زمین تقریباً ثابت بوده است. ولی جمعیت جهان در مدت زمان کمتر از ۲۰۰ سال به سرعت افزایش یافته است. شکل ۱-۱ نمودار میله ای برای توسعه جمعیت طی ۲۰۰ سال گذشته و همچنین پیش‌بینی ۵۰ سال آینده را نشان می‌دهد. [۲]

شکل ۱-۱ موارد زیر را نشان می‌دهد:

- در سال ۱۸۰۴ جمعیت جهان ۱ میلیارد نفر بوده است.
- ۱۲۳ سال طول کشید تا جمعیت جهان در سال ۱۹۲۷ به ۲ میلیارد نفر برسد.
- بعد از ۳۳ سال در سال ۱۹۶۰ جمعیت به ۳ میلیارد نفر افزایش یافت.
- در سال ۱۹۸۷ جمعیت جهان به ۵ میلیارد نفر رسید.
- در سال ۱۹۹۹ جمعیت جهان ۶ میلیارد نفر بوده است.
- در سال ۲۰۲۰ جمعیت کره زمین ۷.۵ میلیارد نفر است و پیش‌بینی می‌شود در سال ۲۰۵۰ به حدود ۹ میلیارد نفر برسد. به این افزایش سریع و چشمگیر جمعیت جهان در کمتر از ۱۰۰ سال ما بین سال‌های ۱۹۶۰ تا ۲۰۰۰ که جمعیت جهان از ۳ به ۶ میلیارد نفر افزایش پیدا کرده است اصطلاحاً "انفجار جمعیت" می‌گویند.



شکل ۱-۱ رشد جمعیت در ۲۰۰ سال گذشته [۲]

۱-۳-۳ آلودگی منابع آب

این رشد جمعیت با گسترش سریع مناطق شهری همراه است و از معایب سبک زندگی شهرنشینی افزایش فعالیت های اقتصادی، مصرف مقادیر زیادی آب آشامیدنی (حدود ۴۰۰ لیتر در روز برای هر نفر) و تولید مقادیر زیادی فاضلاب شهری می باشد که باعث آلوده شدن سفره های آب زیرزمینی می شود. عوامل ناخوشایندی که همگی منابع محدود آب شیرین را بیشتر از پیش تحت فشار قرار می دهند. در حال حاضر حدود ۴۰ درصد از مردم جهان از کمبود جدی آب رنج می برند. اما به خاطر عوامل افزایش جمعیت و تغییر سبک زندگی که توضیح آن ها پیش تر بیان شد پیش بینی می شود تا سال ۲۰۲۵ این درصد به بیش از ۶۰ درصد افزایش یابد. معظلی که باعث می شود اصطلاحات "بحران آب" و "جنگ آب" بیشتر از هر زمان دیگری به گوش ما بخورد. [۳]

هرچند که دولت ها با اتخاذ سیاست های سخت گیرانه در مورد صرفه جویی آب، استفاده مجدد از آب و انجام فرآیند های نمک زدایی برای تأمین منابع کافی آب شیرین تلاش می کنند اما دانستن میزان کل آب های موجود در کره زمین، شناخت انواع منابع آبی، میزان در دسترس پذیری و همچنین شناخت انواع دسته بندی های آب از منظر املاح باعث می شود که تصمیمات کشور ها آگاهانه تر و واقع بینانه تر باشد.

۱-۴ چاره چیست؟

تا به اینجای کار تأثیر سه عامل توزیع محدود و نامتعادل منابع آب شیرین، انفجار جمعیت و همچنین آلودگی منابع آب شیرین بر بحران کم آبی مورد بررسی قرار گرفت. حال سؤال مهمی که مطرح می شود این است که چاره حل مشکل کم آبی چیست؟ برای جواب به این سؤال باید به تجربه موفق کشور های توسعه یافته نگاهی بیاندازیم. با توجه به آن که از مجموع کل مصارف آب، در کشورهای کم درآمد، حدود ۹۰ درصد آب پاک در کشاورزی، ۸ درصد در صنعت و ۲ درصد جهت مصارف خانگی

است در حالی که در کشورهای توسعه یافته و پردرآمد ۵۹ درصد در صنعت، ۳۰ درصد در کشاورزی و

۱۱ درصد خانگی است. [۱] لذا می‌توان به طور خلاصه از راهکارهای موفق زیر نام برد:

۱- به‌کارگیری تجربه کشورهای موفق در زمینه‌ی کشاورزی و تغییر الگوی کشت توسط کشاورزان

۲- اصلاح ساختار مصرف

۳- توجه دقیق به مدیریت جامع منابع آب

۴- ارتقاء سطح فرهنگ مردم و جامعه در استفاده از آب

۵- شیرین‌سازی آب به منظور دستیابی به منابع آبی جدید

نکته حائز اهمیت در استفاده از راهکارهایی که در مورد آن‌ها سخن گفته شد این است که علی‌رغم

پیچیدگی‌های مشکل کمبود آب، در سال‌های اخیر توسعه فناوری‌های جدید امید پیدا کردن یک

راه حل مناسب را ایجاد کرده است. به همین منظور دانشمندان و تکنسین‌های تلاش زیادی کرده‌اند

تا مدیریت منابع موجود آب شیرین را به منظور دستیابی به بازده مطلوب بهینه کنند.

با وجود پیشرفت‌های صورت گرفته در این زمینه، اکنون مشخص شده است که منابع جدید آب

شیرین برای تأمین تقاضای آب شیرین لازم هستند و روند فعلی دیگر پاسخگوی نیاز بشر نیست.

۱-۵ ضرورت شیرین‌سازی آب

اگر تا چند سال پیش استفاده از فرآیندهای نمک زدایی آینده‌نگری محسوب می‌شد الان تبدیل به

یک ضرورت شده است. منابع آب شیرین حاصل از رودخانه‌ها و منابع آب زیرزمینی محدود است و با

سرعت فزاینده‌ای در حال تهی شدن است و زنگ خطر را در بسیاری از مناطق جهان به صدا درآورده

است. از این‌رو استفاده از فرآیندهای شیرین‌سازی آب دریا جهت تأمین آب شیرین موردنیاز تبدیل به

یک ضرورت شده است.

در دهه‌های گذشته بیشتر کشورها بحران کم‌آبی را تجربه کرده‌اند. اکثر کشورهای خشک و

نیمه‌خشک مانند ایران با مشکلات ناشی از کمبود آب مواجه هستند. در نتیجه کشورها درصدد

تأمین منابع آب مورد نیاز خود به میزان بالا هستند. شیرین سازی آب دریا از نیمه دوم قرن بیستم ثابت کرده است که می تواند یک منبع آب قابل اعتماد و از نظر اقتصادی راهکاری پایدار برای تأمین آب مورد جهت مصارف کشاورزی، صنعتی و خانگی در بسیاری از مناطق جهان از جمله کشورهای حاشیه خلیج فارس باشد. از طرفی اقیانوس ها و دریاها یکی از بزرگترین منابع ذخیره آب شور به شمار می روند و صنعت شیرین سازی آب یک راه حل منطقی و مطمئن برای حل این مشکل می باشد.

پیشرفت مداوم فناوری های نمک زدایی، آن را به گزینه ای عملی و کاملاً رقابتی در برابر واردات یا حمل و نقل آب تبدیل کرده است. بنابراین نمک زدایی برنامه ای است که شامل صرفه جویی و استفاده مجدد از آب است و می تواند منبع پایداری از آب آشامیدنی را فراهم می کند.

تعداد فناوری های به اثبات رسیده شیرین سازی آب زیاد است اما بطور کلی هزینه تولید آب شیرین در همه این روش ها تقریباً یکسان بوده و هزینه نسبتاً بالایی دارد. اما مزایا و معایب هر کدام از آن ها و همچنین کمیت و کیفیت آب مصرفی مورد نیاز باعث مناسب بودن هر کدام از این روش ها در هر مورد خاص می شود.

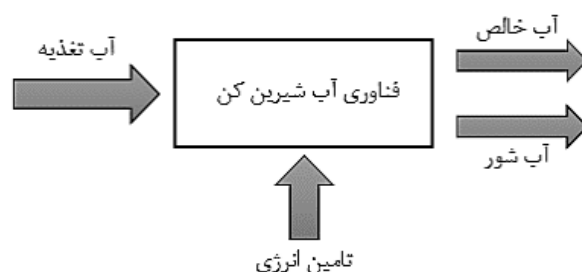
برای تصمیم گیری بهتر در انتخاب روش مناسب نمک زدایی، ابتدا در ادامه با مفهوم فرایند نمک زدایی و انواع آن آشنا می شویم، سپس به توضیح مختصری پیرامون مزایا و معایب و مقایسه روش های مختلف نمک زدایی پردازیم.

۱-۶ نمک زدایی چیست؟

فرآیندهای نمک زدایی و یا شیرین سازی فرآیندهایی هستند که به منظور خالص سازی آب دریا برای مصارف آشامیدنی استفاده می شوند. همه آنها بر اساس این اصل هستند که آب و نمک به طور خود به خود از یکدیگر جدا نمی شوند. بنابراین برای تأمین انرژی فرایند جداسازی به نوعی منبع انرژی احتیاج دارند. یک سیستم آب شیرین کن به طور کلی آب شور را به دو جریان تقسیم می کند، یکی جریان آب شیرین با درصد بسیار کمی از نمک و املاح و دیگری جریانی که حاوی نمک و املاح

باقیمانده می باشد. روند معمول نمک زدایی در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. در این روند با صرف انرژی، آب خالص از آب شور جدا می شود. یعنی آب شور وارد سیستم تصفیه شده و با صرف انرژی طی روند نمک زدایی، آب خالص جدا شده و پساب شور از سمت دیگر خارج می گردد.

از نظر تاریخی، اولین واحدهای نمک زدایی ساخته شده توسط انسان، تولید آب شیرین بر اساس تبخیر آب خالص از طریق افزودن گرمای تأمین شده توسط خورشید یا فرآیندهای احتراقی بوده است. روشی که ملوانان در سفرهای دریایی طولانی و یا سربازان جنگی در نواحی دور افتاده از آن برای تأمین آب شرب مورد نیاز خود استفاده می کردند.



شکل ۱-۲ شماتیک دستگاه آب شیرین کن [۱]

قبل از آن که به توضیح انواع فرآیندهای نمک زدایی بپردازیم لازم است این موضوع روشن گردد که میان مفاهیم آب شیرین و آب شور چه تفاوت هایی وجود دارد؟ و اساساً از منظر ترکیبات، آب ها چگونه اند؟ و به چند دسته تقسیم می شوند؟

توجه به این نکته ضروری است که با آشنا شدن با مفاهیمی از قبیل غلظت و محدوده ی شوری و شیرینی آب می توانیم بهترین تصمیم را برای انتخاب روش مناسب نمک زدایی داشته باشیم.

۷-۱ دسته بندی آب از لحاظ غلظت مواد محلول

همانطور که می دانیم خواص آب شیرین به خاطر میزان نمک نسبتاً کمی که در آن ها وجود دارد با خواص آب دریا تفاوت های اساسی دارد. جدول ۱-۱ طبقه بندی بسیار ساده ای از آب های طبیعی را بر اساس میزان شوری آن ها نشان می دهد.

جدول ۱-۱ طبقه‌بندی منابع آبی کره زمین براساس میزان شوری [۱]

نوع	کل مواد جامد محلول (TDS)*	توضیحات
آب شیرین (Fresh water)	تا ۱۵۰۰	ترکیب شیمیایی متغیر
آب شور مزه (Brackish water)	۱۰۰۰۰ - ۳۰۰۰	ترکیب شیمیایی متغیر
آب نمکی (Salt water)	بیشتر از ۱۰۰۰۰	ترکیب شیمیایی متغیر
آب دریا (sea water)	۴۵۰۰۰ - ۱۰۰۰۰	ترکیب شیمیایی ثابت
آب دریا استاندارد (Standard seawater)	۳۵۰۰۰	ترکیب شیمیایی ثابت

*TDS: Total dissolved solids (ppm)

شوری آب دریا با توجه به شرایط محلی متفاوت است. شوری کم ممکن است در نتیجه وجود جریان های ورودی از رودخانه ها و یخ های ذوب شده و همچنین به دلیل فراوانی بارش باشد. شوری زیاد ممکن است نتیجه دور بودن از خشکی ها و دمای بالا باشد که باعث تبخیر می شود. به عنوان مثال، شوری آب خلیج فارس در نزدیکی خطوط سواحل کویت، عربستان سعودی و امارات متحده عربی بخاطر نبود رودخانه ممکن است به حداکثر مقدار ۵۰۰۰۰ ppm برسد. از طرف دیگر، شوری آب خلیج غربی فلوریدا، در ایالات متحده آمریکا، ممکن است به مقدار نسبتاً کم ۳۰۰۰۰ ppm برسد که این به دلیل مقدار زیادی آب شیرین دریافت شده از رودخانه ها و چشمه های موجود آن منطقه است. [۱]

در مقیاس صنعتی، کمترین شوری آب برای آب ورودی دیگ های بخار و برنامه های مربوط به صنعت الکترونیک و داروسازی می باشد. کیفیت آب برای این برنامه به حداکثر شوری ۵ ppm محدود می شود. برای رسیدن به این درجه خلوص بالا از مبدل های یونی استفاده می شود که با آب رودخانه با شوری کم یا آب خروجی از آب شیرین کن های صنعتی کار می کند. برای دیگر کاربردهای صنعتی، از کیفیت کمتری نسبت به دیگ های بخار استفاده می شود. این کاربردها شامل واکنش های شیمیایی، لبنیات و غذا، شستشو، تمیز کردن و خنک سازی هستند.

درجه بعدی آب برای نوشیدن، اهداف خانگی و تعدادی از کاربردهای صنعتی اختصاص پیدا می - کند. دامنه شوری این گروه ۵ تا ۱۵۰۰ ppm است. این نوع آب در رودخانه ها و دریاچه ها یافت می -

شود و می تواند با فرآیندهای نمک زدایی صنعتی تولید شود. سرانه مصرف این گروه ۲۰۰ تا ۴۰۰ لیتر در روز است که برای نوشیدن پخت و پز، شستشو، نظافت، باغبانی و سایر موارد استفاده می شود. دسته سوم آب دارای محدوده شوری ۱۵۰۰ تا ۳۰۰۰ ppm است. این نوع آب برای اهداف کشاورزی و خنک کننده صنعتی مناسب است.

دسته بندی بعدی مربوط به آب با شوری بین ۳۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ ppm است که آب شور مزه نامیده می شود. این نوع آب خاصیت خوراکی و یا کشاورزی ندارد و استفاده از این نوع آب در صنعت برای خنک کاری سبب رسوب گذاری بالا در خط لوله و خوردگی و یا پوسیدگی تجهیزات صنعتی می شود.

۸-۱ ترکیبات آب دریا و آب رودخانه

شوری آب دریا به طور معمول از ۱۰،۰۰۰ ppm (در دریای بالتیک) تا ۴۵،۰۰۰ ppm (در خلیج فارس) متغیر است اما متوسط شوری آب دریا ۳۵۰۰۰ ppm در نظر گرفته شده است. ترکیب معمول آب دریا در جدول ۲-۱ آمده است.

جدول ۲-۱ اجزای تشکیل دهنده آب استاندارد دریا [۱]

نوع یون	غلظت (ppm)	درصد کلی یون (%)
کلراید (Cl^-)	۱۹/۳۴۵	۵۵
سدیم (Na^+)	۱۰/۷۵۲	۳۰/۶
سولفات (SO_4^{2-})	۲/۷۰۱	۷/۶
منیزیم (Mg^{2+})	۱/۲۹۵	۳/۷
کلسیم (Ca^{2+})	۴۱۶	۱/۲
پتاسیم (K^+)	۳۹۰	۱/۱
بی کربنات (HCO_3^-)	۱۴۵	۰/۴
برم (Br^-)	۶۶	۰/۲
بورات (BO_3^{3-})	۲۷	۰/۰۸
استرانسیم (Sr^{2+})	۱۳	۰/۰۴
فلوراید (F^-)	۱	۰/۰۰۳

اصلی ترین ترکیبات شیمیایی موجود در آب دریا اساساً سدیم (۳۰٪) و کلراید (۵۵٪) است. یعنی اجزای نمک معمولی خوراکی ۸۵٪ محتوای کل مواد جامد محلول آب دریا را تشکیل می دهد. سولفات و منیزیم نیز به ترتیب با درصد تقریباً ۸ و ۴ درصد در آب وجود دارند. لازم به ذکر است که اگرچه شوری آب دریا با توجه به هر منطقه خاص جهان ممکن است متفاوت باشد اما درصد ترکیب آب دریا اساساً در سراسر جهان ثابت است. (یعنی نسبت ترکیبات اصلی ثابت است).

ترکیبات موجود در آب دریا که در بالا توضیح داده شد، کاملاً متفاوت از یک آب معمول رودخانه ای است. در جدول ۱-۳ ترکیبات آب رودخانه و آب دریا با یکدیگر مقایسه شده اند.

جدول ۱-۳ ترکیبات آب رودخانه و آب دریا [۱]

نوع یون	درصد کلی یون های موجود در آب رودخانه	درصد کلی یون های موجود در آب دریا
کلراید (Cl^-)	۸.۶	۵۵
سدیم (Na^+)	۶/۹	۳۰/۶
سولفات (SO_4^{2-})	۱۲/۴	۷/۶
منیزیم (Mg^{2+})	۴/۶	۳/۷
کلسیم (Ca^{2+})	۱۶/۶	۱/۲
پتاسیم (K^+)	۲/۶	۱/۱
بی کربنات (HCO_3^-)	۳۱/۹	۰/۴
برم (Br^-)	-	۰/۲
برات (BO_3^{3-})	-	۰/۰۸
استرانسیم (Sr^{2+})	-	۰/۰۴
فلوراید (F^-)	-	۰/۰۰۳
سیلیکا (SiO_2)	۱۴/۶	-
آهن (Fe^{2+})	۰/۷	-
نیتрат (NO_3^-)	۱/۱	-

مقایسه آب رودخانه با آب دریا این واقعیت را برجسته می کند که محتوای سدیم کلرید در آب رودخانه بسیار کمتر از آب دریا و در حدود ۱۶٪ است. بالعکس مقدار کلسیم و بی کربنات در آب

رودخانه به مراتب بیشتر از آب دریا است و تقریباً ۵۰٪ از کل مواد جامد محلول در آب رودخانه را تشکیل می دهد. (به ترتیب حدود ۱۷ و ۳۲٪) سیلیس نیز یکی دیگر از ترکیبات مهم آب رودخانه می باشد. (حدود ۱۴٪)

نکته بسیار مهمی که باید به آن توجه کرد آن است که بخاطر وجود درصد بالای جامدات محلول در آب دریا (TDS)، خصوصیات فیزیکی آب دریا با آب شیرین بسیار متفاوت است. این موضوع خواص ترمودینامیکی آب دریا را به شدت تحت تأثیر قرار می دهد. خواصی که در انتخاب نوع و طراحی روش بهینه نمک زدایی بسیار حائز اهمیت هستند. جدول ۴-۱ خصوصیات ترمودینامیکی اصلی را در مورد ترکیب استاندارد آب دریا را با شوری ۳۵۰۰۰ ppm و در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد نشان می دهد. [۱]

جدول ۴-۱ خصوصیات ترمودینامیکی آب استاندارد دریا [۱]

اندازه	خاصیت ترمودینامیکی و سیالاتی
۱/۰۲۴	چگالی (kg/m^3)
$10 \times 1/074$	ویسکوزیته (kg/m.s)
۳/۹۹۸	گرمای ویژه ($\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$)
۲۷	فشار اسمزی (bar)
۰/۳۲	اختلاف نقطه جوش در ۲۰ درجه سانتیگراد ($^\circ\text{C}$)
۰/۵۱	اختلاف نقطه جوش در ۱۰۰ درجه سانتیگراد ($^\circ\text{C}$)

شایان ذکر است که هم فشار اسمزی و هم نقطه جوش از ویژگی های اساسی در طراحی و بهره برداری از فرآیندهای نمک زدایی غشایی و حرارتی هستند که جلوتر به توضیح آن ها می پردازیم.

فشار اسمزی مربوط به مقدار یون های محلول در آب نمک است و به شدت بر تمایل آب برای عبور از غشاءهای نیمه تراوا، برای جداسازی آب شیرین از یک جریان شور تأثیر می گذارد.

اختلاف نقطه جوش نیز نشان دهنده افزایش دمای جوش محلول به خاطر وجود ناخالصی است.

این پارامتر به شدت به غلظت نمک در محلول وابسته است و تا حد زیادی بر پدیده های تبخیر آب دریا تأثیر می گذارد. لذا بر عملکرد کلی فرآیندهای جداسازی تبخیری نیز تأثیرگذار است. حال که با انواع آب های شور و شیرین و ترکیبات آنها آشنا شدیم، وقت آن فرا رسیده است که بدانیم فرآیند نمک زدایی شامل چه روش هایی می شود.

۹-۱ انواع روش های نمک زدایی

به چندین روش می توان انواع روش های شیرین سازی آب را دسته بندی کرد. ولی یکی از اصلی ترین روش های دسته بندی از منظر نوع فرآیند انتقال حرارت می باشد. فرآیندهای جداسازی نمک از مخلوط آب نمک به منظور شیرین سازی آب، فرآیندهایی ترمودینامیکی هستند که انرژی گیر بوده و با انتقال حرارت همراه اند. گاهی این انتقال حرارت سبب تغییر فاز آب می شود و گاهی هم تغییری در فاز آب ایجاد نمی کند. لذا روش های نمک زدایی از منظر تغییر فاز آب به دو دسته تقسیم می شوند:

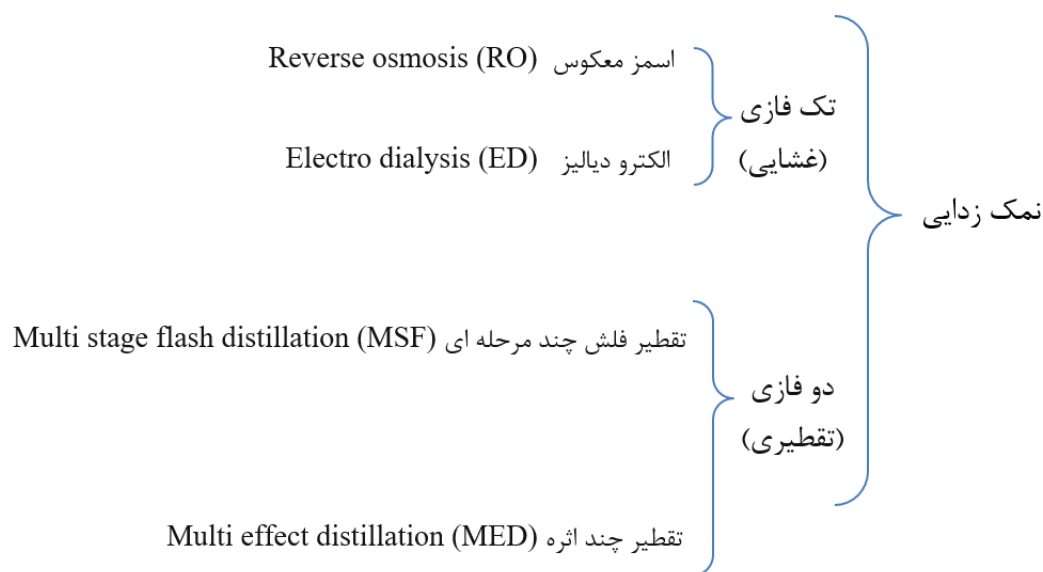
الف) روش های نمک زدایی که تغییری در فاز آب ایجاد نمی کنند (نمک زدایی تک فازی)

ب) روش های نمک زدایی که سبب تغییر فاز آب می شوند (نمک زدایی دوفازی)

که هر کدام از این روش ها شامل چندین نوع فرآیند مختلف به شرح زیر است:

کارایی هر کدام از این فرآیندها بستگی به غلظت نمک در آب تغذیه و همچنین هزینه نهایی تولید آب شیرین دارد.

تأمین این انرژی سبب شده است تا کشورها رویکرد های فنی مهندسی و اقتصادی مختلفی را به منظور کاهش هزینه ها اتخاذ کنند. جهت انجام روند شیرین سازی آب به مقدار زیادی انرژی نیاز داریم که این انرژی می تواند از طریق انرژی گرمایی، مکانیکی یا الکتریکی تامین شود. به تازگی استفاده از انرژی های تجدید پذیر برای تولید آب شیرین از آب دریا منجر به تولید فن آوری های جدیدی شده است که می تواند تأثیرات زیست محیطی را که فرآیندهای نمک زدایی می تواند به دلیل مصرف زیاد انرژی ایجاد کند، به حداقل برساند.



۱-۹-۱ نمک زدایی تک فازی

با توجه به دسته بندی روش های نمک زدایی، از میان روش های تک فازی (که به روش غشایی نیز شناخته می شود) به بیان دو روش مهم اسمز معکوس و الکترو دیالیز می پردازیم.

۱-۹-۱-۱ روش اسمز معکوس (RO)

قبل از توضیح این روش لازم است دو اصطلاح غشای نیمه تراوا و اسمز را توضیح دهیم.

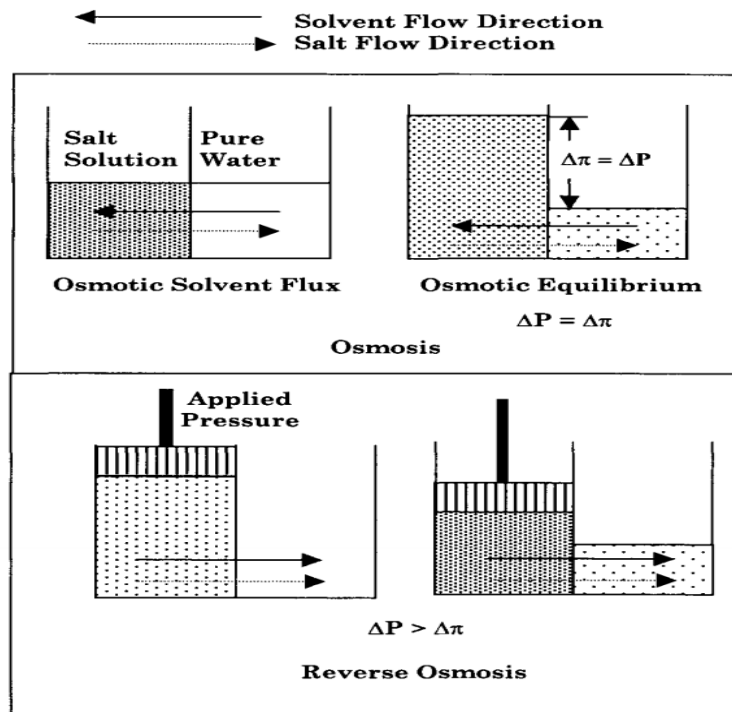
غشای نیمه تراوا: به غشایی گفته می‌شود که نسبت به برخی از مولکول‌ها نفوذ پذیر و نسبت به بعضی دیگر نفوذ ناپذیر است. میزان عبور از غشای نیمه‌تراوا، به فشار، غلظت و دمای مولکول یا یون آن سوی غشاء وابسته است.

اسمز: به فرایندی گفته می‌شود که طی آن حلال از طریق یک غشای نیمه تراوا از جایی که محلول رقیق‌تر است به جایی که محلول غلیظ‌تر است، نفوذ می‌کند. در واقع اسمز، حرکت و جنبش خود به خودی مولکول‌های حلال در گذر از غشای نیمه تراوا به درون منطقه‌ای با غلظت بیشتر مواد حل شونده می‌باشد. جهت جریان حلال توسط پتانسیل شیمیایی آن تعیین می‌شود که تابعی از فشار، دما و غلظت مواد جامد محلول است. جریان اسمز از طرف حلال در سراسر غشاء به سمت محلول نمک تا زمان ادامه پیدا می‌کند که هر دو طرف غشاء به تعادل پتانسیل شیمیایی برسند. این خاصیت محلول مستقل از غشاء^۱ است.

مطابق قانون اسمز، چنانچه دو محلول آبی با غلظت‌های متفاوت توسط یک غشاء نیمه تراوا از یکدیگر جدا شوند مولکول‌های آب محلول رقیق‌تر از منافذ غشاء نیمه تراوا به طرف محلول غلیظ‌تر حرکت می‌کنند. عاملی که تحت آن، این حرکت انجام می‌گیرد فشار اسمزی ($\Delta\pi$) نام دارد. این حرکت آنقدر ادامه می‌یابد تا آنکه فشار اسمزی خنثی گردد. (تعادل پتانسیل شیمیایی برقرار شود) شماتیک پدیده اسمز و اسمز معکوس در شکل ۱-۳ نشان داده شده است. روش نمک زدایی اسمز معکوس فرایند تصفیه آبی است که در آن از اعمال فشار برای معکوس نمودن جریان اسمزی آب از درون یک غشای نیمه‌تراوا برای تولید آب خالص و حذف یون‌ها، مولکول‌ها و ذرات بزرگتر حل شده در آب استفاده می‌شود. یعنی چنانچه فشاری برابر با اختلاف فشار اسمزی ($\Delta\pi = P\Delta$) به محلول غلیظ‌تر اعمال گردد جریان آب قطع خواهد شد ولی اگر فشار اعمال شده بیشتر از فشار اسمزی باشد

¹ membrane

($\Delta\pi > P$) جهت جریان طبیعی آب، معکوس خواهد گردید و مولکول‌های آب از محلول غلیظ به



شکل ۳-۱ شماتیک پدیده اسمز و اسمز معکوس [۲]

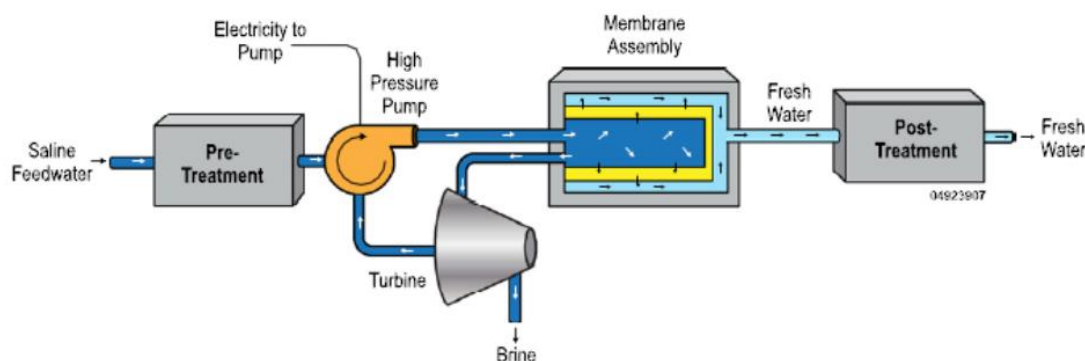
طرف محلول رقیق حرکت کرده و املاح آب را در طرف دیگر غشاء باقی می‌گذارند. بدین ترتیب می‌توان درصد املاح آب همچون کلراید، سولفات، بی کربنات سدیم، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و سیلیس محلول در آب را تقلیل داد. [۲]

در این روش آب توسط پمپ فشار قوی به داخل غشای نیمه تراوا که دارای منافذ بسیار ریزی به قطر حدود ۴۰ میکرون است پمپاژ می‌شود. این منافذ که قطر آن از موی سر انسان نیز کمتر است از عبور ناخالصی‌های آب جلوگیری نموده و آب تقریباً خالص از یک طرف و املاح تغلیظ شده از طرف دیگر در مسیرهای جداگانه جریان می‌یابند.

فشار لازم بستگی به میزان نمک حل شدنی دارد ولی به طور معمول برای آب دریا به ۷۰ بار فشار احتیاج است. نیم تا دو سوم آب همراه با املاح تغلیظ شده پشت این غشاء باقی می‌ماند که به عنوان

آب پسماند^۱ دور ریخته می‌شود. می‌توان پسماند خروجی را مجدداً به سیستم بازگرداند تا در مصرف آب صرفه جویی شود و راندمان سیستم نیز افزایش یابد.

جزء اصلی دستگاه اسمز معکوس همان غشاء نیمه تراوا است که به طور مصنوعی از الیاف سلولزی، پلی آمید و ... ساخته می‌شود. غشاء برای آب خالص، تراوا و برای ناخالصی‌ها، ناتراوا می‌باشد. غشاء



شکل ۴-۱ اساس فرایند اسمز معکوس [۲]

باید دارای ویژگی‌هایی نظیر قدرت تحمل فشار بالا، مقاومت در برابر تغییرات PH، مقاومت در برابر آلودگی‌های بیولوژیکی و ... باشد. از این رو این بخش حساس‌ترین قسمت دستگاه بوده و بایستی مسایل ویژه‌ای را در مورد انتخاب و به کارگیری آن لحاظ کرد. با توجه به همین موضوع می‌بایست آب ورودی به دستگاه قبلاً تصفیه مقدماتی گردد. به عنوان مثال چنانچه آب آلودگی میکروبی (باکتری) داشته باشد لازم است قبل از ورود به غشاء ضدعفونی گردد. برای این منظور از اُزن، کلر و یا اشعه ماورای بنفش استفاده می‌گردد و یا چنانچه آب دارای ذرات معلق باشد از فیلترهای تحت فشار و یا فیلترهای شنی استفاده می‌شود.

مزایای روش اسمز معکوس :

با توجه به توسعه روش‌های پیشرفته تولید غشاهای پلیمری، به کارگیری این روش با اقبال گسترده‌ای مواجه شده است. از مزایای این روش می‌توان به هزینه‌های عملیاتی کم، اشغال فضای نسبتاً کم،

¹ Concentrate

قابلیت انعطاف پذیری و کنترل بیشتر برای تغییر ظرفیت و یا تغییر کیفیت آب ورودی و بهره برداری نسبتاً ساده اشاره کرد.

معایب روش اسمز معکوس :

یکی از معایب این روش مصرف انرژی (برق) بالا به دلیل اعمال فشار زیاد حین فرآیند نمک زدایی است. عیب دیگر این روش هدر رفت نسبتاً زیاد آب است. به طوری که در آب های نیمه شور پساب سیستم در حدود ۲۵ درصد آب ورودی و در آب های شور (آب دریا) در حدود ۷۰ درصد آب ورودی می باشد. هزینه سرمایه گذاری اولیه این روش بالاست همچنین غشاء های دستگاه اسمز معکوس بسیار حساس اند لذا دقت کافی در انتخاب دستگاه های پیش تصفیه و همچنین کنترل شرایط عملیاتی صحیح کار نمک زدایی را سخت می کند.

یکی دیگر از مشکلاتی که در این روش ممکن است رخ بدهد پدیده رسوب گرفتگی غشاء می باشد. به علت فرآیند تغلیظ نمک های محلول در روش اسمز معکوس این نمک ها پس از رسیدن به حالت اشباع شروع به ته نشین شدن بر روی غشاء می کنند که باعث گرفتگی غشاء می شود. فرایند زدودن این رسوبات از غشاء همراه با صرف هزینه و زمان است. شایع ترین این رسوبات سولفات کلسیم و منیزیم می باشد.

۱-۹-۲ روش الکترو دیالیز (ED)

الکترو دیالیز^۱ که یکی از روش های نمک زدایی آب می باشد یک فرایند جداسازی غشایی است که در آن از اختلاف پتانسیل الکتریکی به عنوان نیروی محرکه جهت انتقال یون ها استفاده می شود. با اعمال پتانسیل الکتریکی نمک های آب به صورت انتخاب پذیر از غشایی عبور کرده و آب شیرین به عنوان محصول نهایی از سیستم خارج می شود. مقدار الکتریسیته مورد نیاز جهت تأمین این اختلاف پتانسیل به میزان شوری آب تغذیه بستگی دارد و با افزایش شوری آب افزایش می یابد.

¹ Electrodialysis

استفاده می‌گردد. این رزین ها بر روی پارچه هایی پلیمری مانند پلی اتیلن پوشش داده می‌شوند. غشاهای کاتیونی نسبت به کاتیون ها تراوا می باشند و آنیون ها نیز فقط می توانند از غشاهای آنیونی عبور نمایند (غشاها نیمه تراوا هستند) فضای بین دو غشای غیر همنام سل نامیده می شود. میدان الکتریکی اعمال شده سبب مهاجرت یون‌های مثبت (کاتیون‌ها) به کاتد (قطب منفی) و یون‌های منفی (آنیون‌ها) به آند (قطب مثبت) می‌گردد. در حین فرایند مهاجرت، آنیون‌ها از غشاهای انتخاب پذیر آنیونی گذر می‌کنند اما توسط غشاهای انتخاب‌پذیر کاتیونی بازگردانده می‌شوند؛ عملی مشابه توسط کاتیون‌ها نیز رخ می‌دهد. نتیجه‌ی کلی آن که یون های (Na) که بار الکتریکی مثبت دارند به طرف کاتد و یون های (Cl) که بار الکتریکی منفی دارند به طرف آند کشیده می شوند. در نتیجه مطابق شکل TDS آب در برخی از سل ها کاسته می شود و در بقیه افزایش می یابد یعنی با افزایش غلظت یون ها در سل های ۱، ۳ و ۵، آب در سل های ۲ و ۴ نمک زدایی می شود. در انتها، محلول های رقیق شده به عنوان آب شیرین و محلول‌های تغلیظ شده به عنوان آب شور یا پساب از سیستم خارج می‌شوند.

مزایا روش روش الکترو دیالیز

- ۱- همانطور که گفته شد به علت مصرف انرژی کمتر در قیاس با روش های گرمایی، عملکرد مقرون به صرفه تری دارد. فضای کمی نیاز دارد. بدون آلودگی، ایمن و قابل اطمینان است.
- ۲- سیستم های پیشرفته دستگاه الکترودیالیز به شیوه ای طراحی شده اند که در حدود هر ۱۵ دقیقه یک مرتبه قطب کاتد و آند جابجا می شوند و به طور اتوماتیک از رسوب روی الکترودها و گرفتگی غشاها کاسته می شود.
- ۳- هرچه فاصله سل ها کمتر باشد مقاومت الکتریکی کمتر می‌شود و در نتیجه در هزینه برق صرفه جویی می شود.

معایب روش الکترو دیالیز

۱- به کمک روش الکترو دیالیز فقط می توان میزان یون های آب را کاهش داد ولی ذرات معلق

بدون بار و یا رنگ آب را نمی توان با این روش بهبود بخشید.

۲- میکرو ارگانیسم ها (باکتری ها) در این روش قابل حذف نیستند.

۳- باید توجه داشت که مقاومت الکتریکی یک جفت سل بستگی به غلظت یون های آب خام و

آب تصفیه شده آن دارد یعنی هر چه تعداد یون های آب تصفیه شده کمتر باشد (آب خالص

تر باشد) مقاومت الکتریکی بیشتر می شود لذا به اختلاف پتانسیل بیشتری برای ایجاد جریان

الکتریکی نیاز داریم و هزینه برق افزایش می یابد بنابراین تهیه آب کاملاً خالص و بدون یون

ناخالصی با روش الکترو دیالیز عملاً اقتصادی نمی باشد. (مقاومت الکتریکی آب مقطر بسیار

زیاد است)

۴- از مهم ترین معایب این روش می توان به هزینه بالای تعویض غشاهای موجود در دستگاه

اشاره کرد. به همین دلیل است که الکترو دیالیز برای شیرین سازی و تصفیه آب با درجه

سختی خیلی بالا کاربرد زیادی ندارد و بهتر است در کنار سایر روش ها از قبیل اسمز

معکوس و مراحل پیش تصفیه مانند فیلتراسیون و منعقد سازی استفاده شود. بنابراین این

فرایند برای آب خیلی شور مناسب نیست و بیشترین کاربرد آن در تهیه آب آشامیدنی یا آب

صنعتی از آب هایی با TDS کمتر از ۵۰۰۰ ppm می باشد.

اکثر راه های معمول نمک زدایی دوفازی آب شامل فرآیندهای جوشش و تبخیر (تقطیر) است.

۱-۹-۲ نمک زدایی دوفازی

پس از توضیح روش های نمک زدایی تک فازی نوبت به توضیح پیرامون فرایند های نمک زدایی

دوفازی می رسد. تقطیر آب هنوز بهترین و مرسوم ترین روش شیرین سازی دوفازی آب دریا است.

فرآیندهای تقطیر هنوز سهم بزرگی در صنعت شیرین کردن آب دریا دارند و بزرگ‌ترین دستگاه‌های آب شیرین‌کن در کشورهای شبه‌جزیره عرب و یا جاهایی که تولید هم‌زمان توان و آب دارند، بر پایه تقطیر استوار است.

در یک دستگاه تقطیر از تبخیر آب‌شور و چگالش بخار آن، به آب خالص می‌رسیم. به منظور افزایش کارایی می‌توان بعضی از دستگاه‌های تقطیر را به هم متصل نمود و دستگاهی با کارایی بالاتر ایجاد کرد. فرآیند تبخیر مولکول‌های آب به وسیله گرم کردن آب‌شور تا دمای جوش آن اتفاق می‌افتد ولی می‌توان با کم کردن فشار بخار بالای آب‌شور در دماهای پایین‌تری نسبت به نقطه جوش، آب را بخار کرد. به منظور بالا بردن کارایی فرآیند تقطیر، گرمای ایجادشده از مرحله چگالش را برای پیش گرم کردن آب تغذیه مورد استفاده قرار می‌دهند و یا برای دوباره گرم کردن آب‌شور تبخیر نشده استفاده می‌کنند.

دلایلی که هنوز روش تقطیر بهترین انتخاب برای شیرین سازی آب دریا به خصوص در ایستگاه‌های قدرت است به شرح زیر است:

۱- فرآیندهای تقطیر قادر به تولید آب با کیفیت بالا هستند (تا TDS حدود ۲ ppm) این کار به شوری آب دریا بستگی ندارند. در صورتی که فرآیندهای غشایی کاملاً به ذرات جامد حل شده و ترکیب آب دریا بستگی دارند و آب را با کیفیت پایین‌تری تولید می‌کنند.

۲- معمولاً انرژی مصرفی در واحدهای تقطیر آب دریا، از طریق گرمای بخار تأمین می‌شود که اغلب می‌توان به ارزانی این بخار را در نیروگاه‌ها و در خروجی توربین‌های بخار فراهم کرد.

۳- از آنجایی که در فرایند شیرین سازی به روش تقطیر، همانند روش غشایی کمتر به کیفیت آب دریا حساسیت وجود دارد، نیازی به استفاده از مکانیزم‌های پیش تصفیه نمی‌باشد.

۴- در روش تقطیر هزینه‌های عملیاتی، تعمیر و نگهداری با وجود یک نیروگاه حرارتی، به طور عمومی پایین‌تر از واحدهای غشایی است.

دو شاخه اصلی تقطیر آب دریا به شرح زیر است:

تقطیر به کمک چند مرحله انبساط ناگهانی (MSF)

تقطیر چند مرحله‌ای به کمک کاهش فشار در هر مرحله (MED)

۱-۹-۳ نمک زدایی به روش تقطیر فلش چند مرحله‌ای

در این فرایند ابتدا آب شور دریا در داخل محفظه‌هایی به نام گرم‌کن گرم می‌شود. این کار عمدتاً از طریق چگالیده شدن بخار روی تعدادی از لوله‌های موازی در هر محفظه‌ی سیستم انجام می‌گیرد. آب دریا در گرم‌کن انرژی گرمایی بخار محفظه را گرفته و خود گرم می‌شود و بخار چگالیده می‌شود. سپس آب گرم شده به محفظه‌ها (مرحله اواپراتور) جاری می‌شود. در آنجا فشار در حدی تنظیم می‌شود که آب بلافاصله در ورود به محفظه به صورت ناگهانی به جوش می‌آید. در واقع آب به صورت پاشش انفجاری^۱ به بخار تبدیل می‌گردد. این تبدیل به فشار کنترل شده محفظه بستگی دارد و فرایند جوشش تا زمانی ادامه می‌یابد که آب سرد شود. لذا بخشی از آب شور به موجب فشار کمتر در محفظه به بخار تبدیل می‌شود و مابقی به صورت شورآب از مرحله‌ای به مرحله دیگر می‌رود و عمل فلش بدون نیاز به دادن گرمای اضافی مجدداً رخ می‌دهد. می‌توان برای گرم کردن آب ورودی از سیستم آب گرم‌کن‌های خورشیدی نیز استفاده شود ولی معمولاً تأسیسات شیرین سازی با این روش، در کنار تأسیسات نیروگاهی برق ایجاد می‌شوند تا از گرمای اضافی تولید شده در فرایند تولید برق جهت تأمین حرارت مورد نیاز شیرین سازی استفاده شود.

معمولاً یک مجموعه آب شیرین کن MSF^۲ می‌تواند ۴ تا ۴۰ مرحله داشته باشد. بخار تولید شده از طریق فرایند فلاش در هر مرحله پس از چگالیدن روی لوله‌های مبدل حرارتی (گرم‌کن) که در طول هر مرحله تعبیه شده‌اند، به آب شیرین تبدیل می‌گردد. همان‌طور که گفته شد در این مبدل‌ها آب شور دریا بخار حاصل از جوشش را خنک می‌کند. با این کار آب تغذیه به نوبه خود گرم می‌شود،

^۱ Flashing

^۲ Multi stage flashing

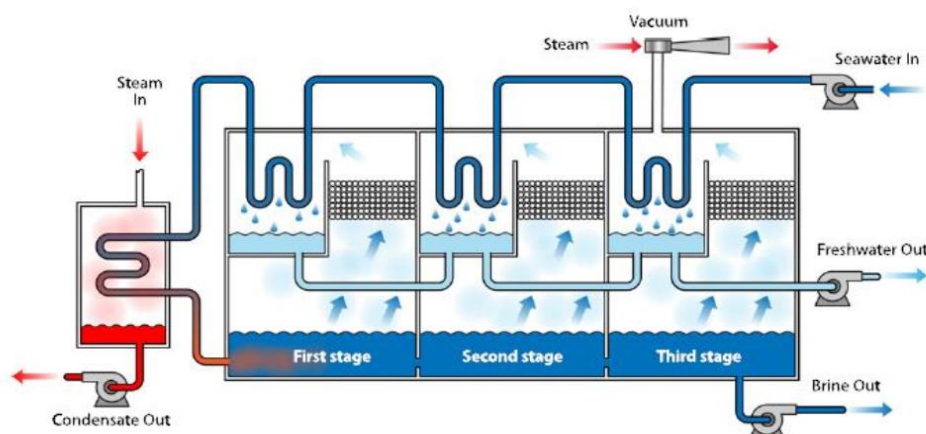
به نحوی که مقدار انرژی حرارتی مورد نیاز در پیش گرم کن آب شور جهت افزایش دمای آب دریا کاهش

می یابد. شکل ۱-۶ شماتیک یک سیستم آب شیرین کن فلاش چند مرحله ای را نمایش می دهد.

از دهه ۱۹۵۰ دستگاه های آب شیرین کن های MSF به طور تجاری ساخته شدند. این دستگاه ها عموماً به صورت واحدهایی با حدود ۵۰.۰۰۰ تا ۶۰.۰۰۰ متر مکعب در روز ساخته می شوند و معمولاً با حداکثر دمای تغذیه ۹۰ تا ۱۲۰ درجه سانتی گراد (پس از گرم کردن آب شور) عمل می کند. یکی از عواملی که بر روی راندمان حرارتی واحد تأثیر دارد اختلاف دمای بین آب پیش گرم شده (هنگام ورود به محفظه) و آب چگالیده شده در انتهای سرد دستگاه است.

به منظور افزایش راندمان در دستگاه های آب شیرین کن MSF در حدود ۵۰ تا ۷۵ درصد آب شور غلیظ شده از آخرین مرحله با آب تغذیه ورودی مخلوط می شود و به واسطه این فرآیند بازیافت حرارتی افزایش و مقدار مواد لازم برای تصفیه مقدماتی کاهش می یابد. ولی متأسفانه این عمل به سبب افزایش غلظت نمک در چرخه آب شور، میزان خوردگی و تشکیل رسوب را افزایش می دهد. همچنین با افزایش تعداد مراحل فرآیند MSF بازده کلی بخاطر بازیافت حرارتی افزایش می یابد و البته در آن صورت هزینه سرمایه گذاری نیز افزایش خواهد یافت.

معمولاً در بین روش های حرارتی، تقطیر فلش چند مرحله ای بیشتر از همه متداول است. بزرگترین کارخانه تقطیر فلش چند مرحله ای کارخانه شیرین سازی شعیبیه^۱ در عربستان سعودی



شکل ۱-۶ شماتیک یک کارخانه تقطیر فلش چند مرحله ای [۲]

^۱ shoaibia

است. این کارخانه در سال ۲۰۰۳ با ظرفیت کل ۰۰۰.۴۵۰ مترمکعب در روز با هزینه پیش بینی شده ۱.۰۶ میلیارد دلار کامل شد.

از مزایای این سیستم این است که برای آب با کیفیت پایین مناسب می باشد و نیاز کمتری به پیش تصفیه دارد. برای رسیدن به کیفیت بالای آب خروجی مطلوب تر است و عمر بهره برداری طولانی تری دارد و به نگهداری و تعمیرات کمتری نیاز دارند.

از معایب این سیستم می توان به انرژی گرمایی مورد نیاز بالای آن اشاره کرد. لذا در واحدهای کوچک مقرون به صرفه نیست. هزینه سرمایه گذاری اولیه آن بالا است. نرخ راه اندازی آن کند است و به مکان وسیعی نیاز دارد.

فرآیند تقطیر فلش چند مرحله ای این روزها مهم ترین نقش را در نمک زدایی آب دریا دارد، ولی اخیراً فرایند تقطیر چند مرحله ای^۱ با اواپراتورهای اسپری آب شور و استفاده از تکنولوژی فیلم نازک^۲ (به جای نوع لوله های غوطه ور) به همراه کمپرسور حرارتی یا مکانیکی بخار، پیشرفت چشمگیری یافته است و باعث کاهش تشکیل رسوب و بهبود عملکرد ترمودینامیکی شده است.

۱-۹-۴ نمک زدایی به روش تقطیر چند اثره

روش نمک زدایی به روش تقطیر چند اثره از لحاظ فنی در ۲۵ سال گذشته پیشرفت های قابل توجهی داشته است. در حال حاضر ۸٪ ظرفیت تولید آب شیرین در جهان به این روش اختصاص دارد. اساس کار دستگاه آب شیرین کن در این روش بر پایه سیستم نمک زدایی تقطیری چند مرحله ای به همراه چرخش بخار است. هر واحد آب شیرین کن از چندین مرحله^۳ و یک کندانسور تشکیل شده است. افکت ها شامل مبدل های پوسته - لوله^۴ با آرایش افقی یا عمودی اند که ممکن است از مبدل

^۱ MED

^۲ Falling film

^۳ Effect

^۴ Shell & tube

صفحه ای^۱ نیز استفاده شود.

اساس کار واحدهای MED به این صورت است که ابتدا بخار خروجی از نیروگاههای بخار و یا بخاری که به واسطه سوزاندن زغال سنگ و یا سوختهای فسیلی دیگر حاصل شده است وارد اولین مرحله می شود. این بخار از دما و فشار پایینی برخوردار است و از آن به عنوان بخار اولیه نام برده می شود. هنگامی که آب تغذیه به اولین مرحله وارد می شود، بر روی لوله های اواپراتور که در آنها بخار اولیه جریان دارد پاشیده شده و به این ترتیب بخشی از آب تغذیه تبخیر می شود و وارد مرحله دوم می گردد. از این بخار به عنوان بخار ثانویه نام برده می شود. بخار اولیه درون لوله های اواپراتور نیز بر اثر از دست دادن حرارت خود چگالیده شده و به بویلر بازگشت داده می شود. همچنین آب شور موجود در مرحله اول به وسیله یک پمپ به مرحله دوم وارد شده و بخار ثانویه نیز که از تبخیر آب تغذیه حاصل شده بود در مرحله دوم با انتقال گرمای نهان خود به آب شور چگالش یافته و بخشی از آب شور را تبخیر می کند. تمام فرآیند فوق به تعداد مراحل که وجود دارد تکرار می گردد و بدین ترتیب بخار چگالش یافته از مرحله دوم به بعد به عنوان آب شیرین جمع آوری می شود و عمل تصفیه نهایی (برای رساندن PH آب به سطح قابل قبول) بر روی آن صورت می گیرد. شکل ۱-۷ شماتیک یک سیستم آب شیرین کن تقطیر چند اثره را نمایش می دهد.

حداقل تعداد مراحل طراحی شده برای انجام یک فرآیند MED به دمای آب تغذیه وابسته است. به این صورت که هرچه دمای آب تغذیه بیشتر و اختلاف آن با دمای جوش آب کمتر باشد تعداد مراحل انجام فرآیند هم می تواند کمتر شود. افزایش تعداد مراحل سبب می شود که نسبت آب شیرین تولیدی به بخار مصرفی افزایش یابد. لازم به ذکر است که در صورت افزایش تعداد مراحل، هزینه های سرمایه گذاری اولیه نیز افزایش پیدا می کند.

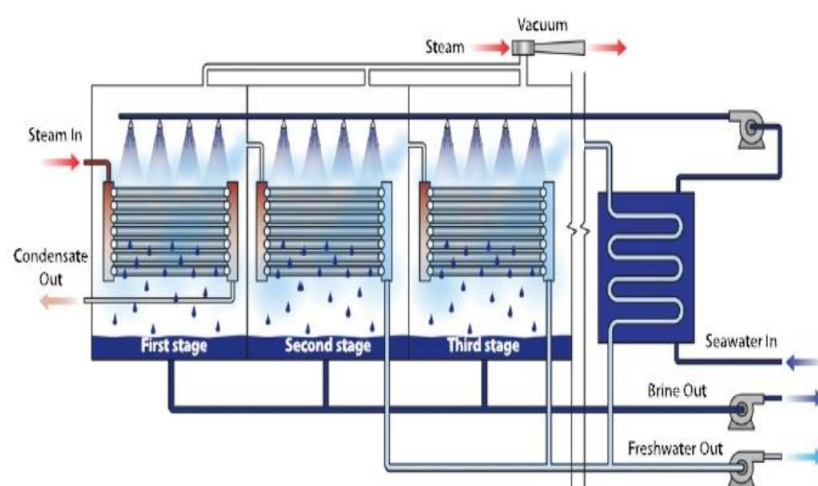
¹ Plate Heat Exchanger

مزایا روش MED

از مزایای این روش می توان به کاهش هزینه های نگهداری، استفاده چند باره از انرژی گرمایی نهان آب، کیفیت بالای آب شیرین شده، قابلیت کار به صورت ۲۴ ساعته قابلیت ترکیب این فرایند با دیگر فرایندهای نمک زدایی، قابلیت انطباق با انواع منابع مختلف مثل آب داغ، سوخت فسیلی، فرایندهای تبخیر صنعتی و... توانایی آن در جدا کردن عوامل بیولوژیکی و معلق، مقاومت بالای این فرایند نسبت به شرایط سخت و قابل اطمینان بودن آن اشاره کرد. همچنین در صورت پایین بودن کیفیت آب شور ورودی، فرایندهای تبخیری به فرآیندهای غشایی ترجیح دارند، زیرا احتیاج به فرایند پیش تصفیه در فرایندهای تقطیر چند اثره، تقطیر فلش چند مرحله ای بسیار کمتر از فرایندهای غشایی است.

معایب

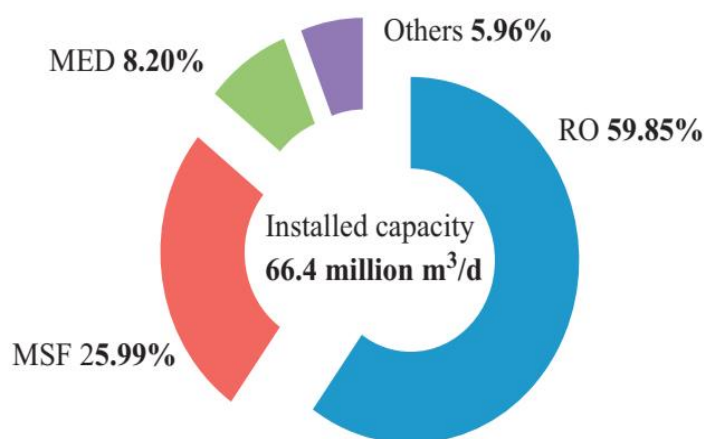
از معایب این روش نیز می توان به مواردی از قبیل عملکرد و طراحی پیچیده، هزینه بالای طراحی و ساخت، سرمایه گذاری اولیه بالا، مصرف بالای انرژی و حساسیت به خوردگی را اشاره کرد. هزینه نگهداری سیستم های تقطیر چند اثره کمی بیش از سیستم تقطیر فلش چند مرحله ای است.



شکل ۷-۱ شماتیک یک کارخانه تقطیر چند اثره [۲]

۱۰-۱ مقایسه روش مختلف نمک زدایی

تا به اینجا به بیان چند روش متداول شیرین سازی آب پرداختیم. ذکر این نکته ضروری است که هر روش شیرین سازی آب محاسن و معایب خاص خود را دارد و هر کدام دارای شرایط عملیاتی متفاوتی اند. ولی به طور کلی در تمامی روش های شیرین سازی آب انرژی زیادی مصرف می شود. هزینه اولیه



شکل ۸-۱ میزان استفاده از روش های مختلف نمک زدایی [۱]

برای سرمایه گذاری و راه اندازی آنها بالا است. همچنین پساب خروجی این فرایند ها تأثیر نامطلوبی بر محیط زیست می گذارد. شکل ۸-۱ میزان استفاده از این روش ها را در سراسر جهان نمایش می دهد.

همانطور که گفته شد هر کدام از این روش ها دارای شرایط عملیاتی متفاوتی هستند و در این شرایط بهترین عملکرد را خواهند داشت. برخی انرژی بیشتری مصرف می کنند، برخی نرخ رسوب گذاری بیشتری دارند، برخی توانایی تولید آب با کیفیت بیشتری را دارند و....

یکی از پارامتر های مهم برای مقایسه روش های مختلف شیرین سازی آب، هزینه تمام شده هر روش برای نمک زدایی حجم مشخصی از آب می باشد که معمولاً این معیار را به صورت دلار در هر مترمکعب بیان می کند. عوامل متعددی بر بهای تمام شده تولید آب به روش شیرین سازی تأثیر می -

گذارند. مهم‌ترین این عوامل عبارتند از: کیفیت آب ورودی، ویژگی های کارخانه، دفع پسماند و میزان مصرف انرژی. در ادامه به بیان این عوامل می‌پردازیم.

۱-۱۰-۱ کیفیت آب ورودی

کیفیت آب ورودی نقش مهمی در هزینه نمک زدایی دارد. ناگفته پیداست که شیرین سازی آب هایی با غلظت کمتر نمک در مقایسه با آب های با غلظت بالاتر آسان تر است و انرژی کمتری را مصرف می-کند. لذا هزینه شیرین سازی کاهش می‌یابد. پایین بودن غلظت آب ورودی در فرایندهای غشایی باعث می‌شود مواد شیمیایی کمتر شود، عملیات تصفیه مقدماتی آب شور آسان تر صورت بگیرد، نرخ رسوب گذاری کاهش یابد و هزینه تعمیر و نگه داری تعدیل گردد.

۱-۱۰-۲ ویژگی های کارخانه

یکی از مهم‌ترین ویژگی های کارخانه ظرفیت آن می‌باشد که در طراحی کارخانه بسیار تأثیرگذار است. این عامل بر قسمت هایی همچون: حجم مخزن ذخیره سازی آب، قطر و متراژ لوله ها، میزان پمپاژ، اندازه و تعداد مراحل تصفیه و همچنین میزان انرژی مصرفی تأثیر می‌گذارد. کارخانه هایی با ظرفیت بالاتر به سرمایه گذاری اولیه بیشتری نیاز دارند ولی به دلیل مسائل اقتصادی با افزایش تولید آب شیرین، هزینه های کارخانه سرشکن می‌شود. لذا کارخانه های با ظرفیت بالاتر نسبت به کارخانه های با ظرفیت کمتر توجیه اقتصادی بیشتری دارند. جداول ۱-۵ و ۱-۶ مقایسه میان میزان هزینه های تولید آب در روش های مختلف نمک زدایی با ظرفیت های متفاوت را نشان می‌دهد.

جدول ۵-۱ هزینه شیرین سازی آب در فرایند های حرارتی [۱]

فرآیند آب شیرین کن	ظرفیت مجموعه (m^3/day)	هزینه ($US\$/m^3$)
تقطیر چند اثره (MED)	کمتر از ۱۰۰	۲/۵ - ۱۰
	۵۵۰۰۰-۱۲۰۰۰	۰/۹۵ - ۱/۹۵
	بیشتر از ۹۱۰۰۰	۰/۵۲ - ۱/۰۱
تقطیر فلش چند مرحله ای (MSF)	۵۲۸۰۰۰-۲۳۰۰۰	۰/۵۲ - ۱/۷۵
	۱۲۰۰-۱۰۰۰	۲/۰۱ - ۲/۶۶

از دیگر ویژگی های کارخانه، موقعیت محل احداث کارخانه است. به طوری که اگر کارخانه به منبع آب شور و محل تخلیه شورآب غلیظ نزدیک باشد، هزینه های لوله کشی و پمپاژ و خارج کردن پسماند به طرز چشمگیری کاهش می یابد. همچنین اگر کارخانه به مصرف کننده و یا تصفیه خانه نزدیک باشد هزینه های توزیع آب تصفیه شده نیز کاهش می یابد.

جدول ۶-۱ هزینه شیرین سازی آب در فرایند های غشایی [۲]

نوع آب ورودی	ظرفیت مجموعه (m^3/day)	هزینه ($US\$/m^3$)
آب شور	کمتر از ۲۰	۵/۶۳ - ۱۲/۹
	۱۲۰۰-۲۰	۰/۷۸ - ۱/۳۳
	۴۶۰۰۰-۴۰۰۰۰	۰/۲۶ - ۰/۵۴
آب دریا	کمتر از ۱۰۰	۱/۵ - ۱۸/۷۵
	۱۰۰۰-۲۵۰	۱/۲۵ - ۳/۹۳
	۶۰۰۰۰-۱۵۰۰۰	۰/۴۸ - ۱/۶۲
	۳۲۰۰۰۰-۱۰۰۰۰۰	۰/۴۵ - ۰/۶۶

۱-۱۰-۳ دفع پسماند آب شیرین کن ها و فرایند تخلیه مایع به میزان صفر^۱

از مهم ترین برنامه ریزی ها در طراحی سیستم های شیرین سازی آب دریا، چگونگی تخلیه پسماند فرایند نمک زدایی می باشد. یک طراح موفق باید سیستم را طوری طراحی کند که دفع پسماند های فرایند نمک زدایی لطمه ای به محیط زیست وارد نکند. در پسماند آب فرایند نمک زدایی علاوه بر نمک های جدا شده، یون ها و املاح دیگری همچون کربنات کلسیم، سولفات کلسیم، سولفات باریم و سیلیکا وجود دارد که در حین تصفیه آب، به حالت فوق اشباع می رسند. راه پیدا کردن این پسماند به زمین های کشاورزی سبب آلودگی خاک (بایر شدن زمین) و یا در صورت ورود به منابع آبی، سبب برهم خوردن تعادل املاح آب و آلودگی آن می گردد. براساس این محدودیت ها هزینه دفع پسماند در محدوده ۵ تا ۳۳ درصد هزینه آب تولید شده است.

دفع پسماند از عوامل مهم اقتصادی است و همواره تحت تأثیر عوامل مختلفی از قبیل ویژگی های محل کارخانه، ویژگی های زمین شناسی، شرایط خاک و نوع یا روش بازیافت پسماند می باشد. یکی از روش های بازیافت پسماند های نمک زدایی استفاده از فناوری تخلیه مایع به میزان صفر یا ZLD می باشد. در این روش برای استفاده مجدد، پسماند تصفیه می شود. این روش شامل مجموعه ای از مراحل مختلفی است که نتیجه همه آنها بازیافت پسماند و تبدیل آن به مواد بی ضرر می باشد. از جمله این مراحل می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱- اضافه کردن مواد شیمیایی برای کمک به انعقاد مواد جامد معلق
- ۲- استفاده از فرایند فیلتراسیون و کاهش غلظت املاح پسماند
- ۳- استفاده از برکه های تبخیر (کریستالیزه کننده) جهت تبدیل پسماند مایع به پسماند جامد

(کریستالیزاسیون)

از مهم ترین مزایای روش ZLD می توان نکات زیر را برشمرد:

¹ Zero Liquid Discharge

۱- کاهش اثرات مخرب زیست محیطی پسماندها

۲- کاهش مصرف آب و استفاده مجدد از آب تولید شده در این فرایند

۳- صرفه جویی مالی

۴- امکان ایجاد در فضای کوچک و تعداد کم پرسنل

۱۰-۴ میزان مصرف انرژی

در فرایندهای شیرین سازی برای تأمین انرژی، از منابع مختلفی استفاده می‌شود. میزان مصرف هر روش متفاوت است لذا بازده انرژی آنها متفاوت خواهد بود. جدول ۱-۷ مقایسه‌ای از میزان مصرف انرژی را برای دو روش تقطیر فلش چند مرحله ای و تقطیر چند اثره را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۷ مصرف انرژی و میانگین هزینه تولید آب در فرایندهای شیرین سازی در مقیاس بزرگ [۲]

فرآیند آب شیرین کن	انرژی گرمایی	انرژی الکتریکی	انرژی کل	هزینه کل
	(kWh/m^3)	(kWh/m^3)	(kWh/m^3)	$(US$/m^3)$
MSF	۷/۵ - ۱۲	۲/۵ - ۴	۱۶ - ۱۰	۰/۸ - ۱/۵
MED	۷ - ۴	۱/۵ - ۲	۵/۵ - ۹	۰/۷ - ۱/۲

همانطور که گفته شد عوامل متعددی بر هزینه شیرین سازی آب موثر اند. اما به طور کلی میانگین هزینه تولید آب در فرایندهای مختلف شیرین سازی محاسبه و در جدول ۱-۸ نشان داده شده است. در بسیاری از مواقع تأمین آب شرب مصرفی و یا آب مقطر به صورت متمرکز در حجم بالا با مشکلاتی روبه‌رو می‌شود. این مشکلات شامل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بالا، آسیب‌پذیری از نظر امنیتی و استراتژیک، افزایش هزینه‌های نگهداری و افزایش هزینه انتقال یا بسته‌بندی آب محصول است. لذا بسیار مورد نیاز است که برای تأمین آب شرب مصرفی مکان‌های کم‌جمعیت یا کارخانه‌های کوچک نیز

دستگاه آب‌شیرین‌کن مقیاس کوچک یا متوسط در بازه نیم تا صد مترمکعب در روز نیز ساخته شود.

جدول ۸-۱ میانگین هزینه تولید آب در فرایندهای اصلی نمک زدایی [۲]

فرآیند آب شیرین‌کن	نوع آب ورودی	هزینه کل ($US\$/m^3$)
MSF	آب دریا	۰/۵۶ – ۱/۷۵
MED	آب دریا	۰/۵۲ – ۱/۰۱
RO	آب دریا	۰/۴۵ – ۱/۷۲
	آب شور	۰/۲۶ – ۱/۳۳
ED	آب شور	۰/۶ – ۱/۰۵

یکی از بهترین روش‌های شیرین‌سازی آب در مقیاس کوچک استفاده از روش تقطیر چند اثره است. در این روش آب در قسمت اواپراتور و در محفظه خلاء در دمایی پایین‌تر از نقطه جوش خود بخار می‌شود و در قسمت کندانسور، بخار حاصل از تبخیر به آب شیرین مصرفی تبدیل می‌شود. از آنجا که این دستگاه‌ها تاکنون بیشتر برای مقیاس بزرگ (بیشتر از ۱۰۰۰ مترمکعب در روز) طراحی و ساخته شده‌اند، برای طراحی بهینه در مقیاس کوچک (نیم تا ۱۰۰ مترمکعب در روز) با کمبود اطلاعات مواجه هستیم و تحقیقات کمی در این زمینه صورت گرفته است. مخصوصاً در زمینه مبدل‌های لوله‌ای فالینگ فیلم در دبی‌های پایین (رینولدزهای پاششی کوچک) تحقیقات تجربی و تحلیلی بسیار کمی موجود است. با توجه به این‌که روش تقطیر چند اثره شامل یک سیکل به هم پیوسته از مرحله اول تا کندانسور است، طراحی و ساخت دستگاه در مقیاس کوچک پراهمیت و حساس است. مهم‌ترین نکته تخمین ضریب انتقال حرارت فالینگ فیلم و بررسی پارامترهای تأثیر گذار بر آن می‌باشد. از این رو برای طراحی یک سیستم MED نیاز به دانستن ضریب انتقال حرارت (فالینگ فیلم) در فشارهای خلأ متفاوت و شارهای حرارتی متفاوت است. باید دقت شود که پدیده فالینگ فیلم ذات نوسانی داشته و علاوه بر آن در دبی‌های بالا (رینولدز بیشتر از ۲۰۰) آشفته می‌شود. همچنین اگر دبی جریان پاششی کوچک باشد (رینولدز پاششی کمتر از ۱۰۰) احتمال وقوع

سطوح خشک بر روی مجموعه لوله‌ها (در داخل افکت‌ها) افزایش می‌یابد و بر پیچیدگی تخمین ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت و در نتیجه طراحی مبدل می‌افزاید.

لذا برای طراحی MED در مقیاس کوچک (که تأکید پژوهش حاضر بر آن است) نیاز به یک بررسی تجربی دقیق بر روی مبدل‌های فالینگ فیلم با نرخ پاشش جریان کم در فشارها (فشار خلاء) و شارهای حرارتی مختلف است که بتواند نیاز طراحی MED مقیاس کوچک را تأمین کند.

فصل ۲: مروری بر کارهای گذشته

۲-۱ تاریخچه مطالعات شیرین سازی آب

در زمینه آب شیرین کن، پژوهش‌های زیادی در ایران و جهان انجام شده است که در ادامه به بررسی کارهای انجام شده و نقاط ضعف و کاستی آن‌ها با تمرکز بر فرایند MED اشاره می‌شود.

شمیری و صفر در سال ۱۹۹۹ به بررسی نمک‌زدایی و تقطیر چندمرحله‌ای که یکی از قدیمی‌ترین روش‌های شیرین سازی آب است، پرداختند. [۴] ازجمله ویژگی‌های این سیستم آب‌شیرین کن می‌توان به مصرف انرژی اولیه پایین، انتقال حرارت کم و نسبت قدرت بالا اشاره کرد. آن‌ها در مقاله خود، به بحث پیرامون ویژگی‌های تجاری و جنبه‌های فنی مربوط به بخار، کندانسور، اواپراتور، پمپ و ظرفیت پرداختند. آب‌شیرین‌کن‌های مدل MSF در حال حاضر به‌شدت مورد استفاده قرار می‌گیرند و منابع قابل اعتماد برای تولید آب آشامیدنی از دریا در کشورهای خاورمیانه و به ویژه در منطقه خلیج فارس هستند. توسعه MED در چند سال اخیر باعث جایگزینی آن به جای مدل قبلی شده است. آن‌ها همچنین در مورد نسبت افزایش، درجه حرارت کار، مواد مورد استفاده، بهره‌برداری و نگهداری از سیستم، مشکلات مربوط به آن بحث کردند و راه‌حل‌هایی برای شناسایی مناطق توسعه نیز ارائه داده‌اند. کار آن‌ها بیشتر جمع‌آوری اطلاعات و دسته‌بندی آن است و کار تجربی در این حوزه انجام نشده است.

النشار در سال ۲۰۰۱ شرایط اقتصادی روش‌های مرسوم مصرف سوخت‌های فسیلی و استفاده از انرژی خورشیدی در مناطق ساحلی و دور دست که دسترسی به شبکه برق سراسری را ندارند، را بر عملکرد دستگاه MED مقایسه کرده است. [۵] بدین منظور او از سه نوع پیکربندی برای تولید آب شیرین استفاده کرده است. حالت اول دستگاه مرسوم که بخار با بویلر و انرژی پمپاژ با برق تولیدی مولد دیزل تأمین می‌شود. حالت دوم دستگاهی که در آن آب داغ حاصل از کلکتورهای خورشیدی بجای بخار ورودی اواپراتور استفاده شده است اما برق سیستم پمپاژ با استفاده از مولد دیزل تأمین می‌شود. حالت سوم دستگاه خورشیدی که آب داغ آن از کلکتورهای خورشیدی تأمین می‌شود و

انرژی برق آن از صفحات خورشیدی به دست می‌آید. وی عنوان می‌دارد که در مناطق دوردست که قیمت سوخت‌های فسیلی می‌تواند خیلی بالا باشد، استفاده از انرژی خورشیدی می‌تواند جایگزین جذابی باشد. در ادامه او دو پارامتر مهم را قیمت نفت خام و کلکتورهای خورشیدی می‌داند که هرچه قیمت نفت بیشتر و قیمت کلکتور کمتر شود، دستگاه خورشیدی توان رقابت با دستگاه سوخت فسیلی را خواهد داشت. وی ادعا می‌کند که اگر قیمت نفت بیشتر از ۵۰ دلار باشد همیشه قیمت از تولیدی سیستم خورشیدی ارزان‌تر خواهد بود، اما اگر زیر ۱۰ دلار باشد همیشه قیمت از تولیدی سیستم خورشیدی گران‌تر خواهد بود. او در این کار تنها به مقایسه قیمت روش‌های تولید از در سه حالت می‌پردازد و مطالعه پارامتری عوامل مؤثر بر شیرین‌سازی از و بهینه‌سازی از را انجام نمی‌دهد.

رحمان و همکاران در سال ۲۰۰۳ یک MED یک مرحله‌ای با لوله‌های عمودی که در آب اواپراتور خود کامل فروبرفته است (SVTE)^۱ را ساختند. [۶] آن‌ها همچنین یک مدل عددی برای توضیح عملکرد دستگاه خود به وجود آوردند. این دستگاه برای تولید ۳/۳ تن آب شیرین در روز طراحی شده و ضریب انتقال حرارت آن $1000 \text{ W/m}^2\text{K}$ است. نتایج تجربی و عددی آن‌ها نشان داد که دبی و دمای آب گرمایش تأثیر قابل‌توجهی بر تولید آب شیرین دارد. در مقایسه با دبی و دمای آب گرمایش، دبی و دمای آب‌شور ورودی تأثیر کمتری بر تولید آب شیرین داشتند. اما تأثیر دما آب تغذیه قابل‌توجه می‌شود زمانی که پاشش اتفاق می‌افتد. در این کار آن‌ها یک نوع خاص از MED را بررسی کردند و تحلیل انرژی را انجام ندادند. همچنین بهینه‌سازی نیز صورت نگرفته است.

کافی و همکاران در سال ۲۰۰۴ یک MED صفحه‌ای جدید را ارائه کردند [۷]. آن‌ها با استفاده از شبکه‌هایی پایداری جریان فیلم آب را در مبدل صفحه‌ای خود افزایش دادند تا همه سطح‌تر شود و همچنین با این شبکه‌ها تلاطم را افزایش دادند که موجب افزایش ضریب انتقال حرارت نیز شد. مخصوصاً در اعداد رینولدز پایین که احتمال وقوع آشفته‌گی کم است، با این شبکه‌ها و حضور بافل‌ها جریان مغشوش تولید کرده‌اند. آن‌ها ناسلت صفحه‌ای خود را به‌صورت ریاضی مدل کردند. ایشان در

¹ Submerge Vertical Tube Evaporator

این کار تجربی به آرایش خاصی از مبدل‌های صفحه‌ای پرداختند که یکی در میان نقش اوپراتور و کندانسور را انجام می‌دادند و بیشتر بر روی تر شونده‌گی سطح مبدل‌ها و افزایش عدد ناسلت تمرکز کرده و داده گزارش کرده‌اند. آن‌ها در این کار به بررسی پارامتری عوامل مؤثر در هر مبدل پرداختند و مدلی ریاضی یا نرم‌افزاری برای بهبود و بهینه‌سازی طرح خود ارائه نکرده‌اند.

افیر و لوکیس در سال ۲۰۰۵ فرایندی پیشرفته اقتصادی‌ای را برای نمک‌زدایی از آب‌شور را پیشنهاد دادند [۸]. در این مقاله اصول طراحی و ملاحظات مختلف انرژی را مدنظر قراردادند، به‌عنوان مثال برای لوله‌های انتقال حرارت از آلیاژ آلومینیوم و برای اوپراتور از فولاد کربنی استفاده کردند. آب‌شیرین‌کن‌های چندمنظوره (MED) از لحاظ ترمودینامیکی کار آیی بیشتری از تمام فرایندهای تقطیر حرارتی دارد. برای کاهش هزینه‌های تولید آب‌شیرین‌کن از گرمای حاصل از خنک کاری توربین‌های نیروگاه‌ها به‌عنوان منبع حرارت اولیه برای تولید بخار در MED استفاده کردند. همچنین از گرمایی رآکتورهای هسته‌ای عمیق به‌عنوان منبع انرژی اولیه برای بخار آب لازم در آب‌شیرین‌کن نیز استفاده می‌شود. آن‌ها فقط به‌مرور کلی برای منبع گرما موردنیاز در آب‌شیرین‌کن پرداختند و به بررسی المان‌های داخل بخش‌ها و بهینه‌سازی آن‌ها پرداخته‌اند.

پارک و همکاران در سال ۲۰۰۵ برای سیستم آب‌شیرین‌کن چندمرحله‌ای با کمپرسور بخار حرارتی (TVC) که در آب جریان‌های مادون صوت و مافوق صوت ظاهر می‌شود را طراحی کردند [۹]. آن‌ها از طریق تحلیل عددی، پارامترهای مختلف شکل مانند شکل اولیه نازل، شکل کانال مجاور، قطر لوله مخلوط کردن و غیره را طراحی کرده‌اند و عملکرد آن را با نتایج آزمایشگاهی تأیید کردند. همچنین نتایج آزمایشگاهی را برای حالت‌های مختلف (فشار مکش، فشار تخلیه و ...) با نتایج عددی مقایسه نمودند و با دقت ۳/۵ درصد دو نتیجه تطابق خوبی باهم داشته‌اند. آن‌ها در کار خود به بحث بهینه‌سازی اجزا پرداخته‌اند و تأثیر هر پارامتر بر سیستم را مورد مطالعه قرار نداده‌اند.

وانگ و لیور در سال ۲۰۰۶ به تجزیه و تحلیل عملکرد ترکیبی از قدرت تولیدی از توربین گاز و سیستم تولید آب‌شیرین‌کن چندمرحله‌ای پرداختند. [۱۰] آن‌ها در پژوهش خود چرخه توربین گاز-

بخار در سیستم ترکیبی نیرو و آب‌نمک با استفاده از معیارهای عملکرد انرژی و انرژی را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. آن‌ها واحد چندمنظوره فشرده‌سازی بخار (METVC) برای تولید آب شیرین از آب دریا را برای استفاده عمومی راه‌اندازی کردند؛ سپس عملکرد سیستم ترکیبی مبتنی بر STIG مورد بررسی قرار دادند. از جمله نتایج کار آن‌ها این است که زمانی که فشار بخار موتور بالای ۳ بار باشد، یک سیستم آب‌شیرین‌کن چندمرحله‌ای مقرون به صرفه است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که چنین دستگاه‌های دومنظوره، نه تنها در استفاده از سوخت، بلکه در عمل و انعطاف‌پذیری طراحی، جفت‌شدگی خوبی دارند. در کار آن‌ها فقط مدل‌سازی مشاهده می‌شود و به مشاهده و تجزیه تحلیل پروسه داخل هر محفظه پرداخته نشده و تأثیر پارامترهای مؤثر بر روی یکدیگر نیز مطرح نشده است.

سن و همکاران در سال ۲۰۰۷ بر روی نوعی آب‌شیرین‌کن مقیاس کوچک برای مصرف روستایی کار کردند که با مواد محلی و فناوری ساده ساختند [۱۱]. این آب‌شیرین‌کن با پیکربندی سه و شش مرحله با تغذیه پیشرو، مرکزی و مختلط برای تولید ۶۰ تا ۱۰۰ لیتر بر ساعت آب شیرین طراحی شده است. این دستگاه با استفاده از لوله‌های فالینگ فیلم عمودی در اواپراتور (VTE)^۱ ساخته شده است. آن‌ها عنوان کردند که به علت دبی کم، این آرایش لوله‌ها با ناسلت بیشتر نسبت به لوله‌های افقی گزینه مناسب‌تری است. نتایجشان نشان داد که GOR^۲ در حالت تغذیه پیشرو بیشینه است و بار دبی پمپاژ را نیز کاهش می‌دهد لذا هزینه‌ها کاهش می‌یابد. در این کار بهینه‌سازی صورت پذیرفته است همچنین محاسبات انرژی نیز انجام نشده است.

زیچیان و همکاران در سال ۲۰۰۷ یک MED خورشیدی با بازیاب حرارتی به همراه لوله‌های فالینگ فیلم افقی را مطالعه کردند [۱۲]. در این دستگاه قسمت زیادی از گرمای نهان و آشکار کندانس بازیافت می‌شود که مورد استفاده پیش‌گرمایش و تبخیر آب تغذیه می‌شود. در این دستگاه خلأ به وسیله کمپرسوری از محفظه مکش می‌شود و به کندانسور پمپ می‌شود تا هم خلأ تأمین شود هم انرژی نهان آن در کندانسور بازیافت شود. در این دستگاه به علت بازیافت، کمپرس بخار، پاشش

^۱ Vertical Tube Evaporators

^۲ Gain Output Ratio

آب و مبدل فالینگ فیلم عملکرد گرمایی سیستم افزایش یافته و بازدهی آن دو برابر شده است. در این کار آن‌ها به بررسی یک MED جدید پرداختند اما آن را مطالعه پارامتری نکردند و به گزارش کارکرد دستگاه خود پرداختند. همچنین مدل سازی و شبیه سازی و در نتیجه بهینه سازی صورت نگرفته است. کمالی و محببنا در سال ۲۰۰۸ یک کد کامپیوتری برای طراحی، ساخت و پیش بینی عوامل تأثیرگذار بر آب شیرین کن چندمرحله‌ای MED-TVC^۱ نوشته‌اند [۱۳]. آن‌ها دریافتند که دما و فشار داخل سیستم مستقیماً به دما و فشار داخل کندانسور وابسته است. همچنین افزایش سطح تبادل حرارت داخل کندانسور موجب کاهش دمای و فشار داخل کندانسور می‌شود که در نتیجه GOR و عمر دستگاه به دلیل پایین آمدن TBT^۲ افزایش خواهد یافت. این کار بر پایه نوشتن کد کامپیوتری و الگوریتم شبیه سازی است و گزارش کار تجربی یا آزمایشگاهی در آن ارائه نشده است.

کمالی و همکاران در سال ۲۰۰۸ با استفاده از کد کامپیوتری که نوشته‌اند، GOR یک دستگاه آب شیرین کن موجود را با کد خود مقایسه کردند [۱۴]. آن‌ها توانستند عملکرد دستگاه را بهبود ببخشند و کد خود را یک ابزار مناسب برای طراحی و بهینه سازی دستگاه MED-TVC معرفی کنند. کد کامپیوتری آن‌ها پارامترهای مؤثر بر نسبت راندمان، ظرفیت، اختلاف دما و فشار بین هر افکت را در شرایط طراحی و عملکرد پیش بینی می‌کند. در این مقاله عملکرد کد کامپیوتری با دستگاه موجود مقایسه می‌شود و یک ستاپ آزمایشگاهی بر اساس داده‌های کد طراحی نشده تا با شرایط تئوری مقایسه شود و عملکرد کد و دستگاه برای ظرفیت‌ها و تعداد مراحل مختلف شیرین سازی عنوان شود. صیادی و صفری در سال ۲۰۰۹ سیستم آب شیرین کن MED را بهینه سازی ترمودینامیکی بر اساس انرژی و انرژی کردند تا هزینه محصول (آب شیرین) را به حداقل برسانند [۱۵]. آن‌ها یک مدل اقتصادی از سیستم، بر اساس روش کل درآمد مورد نیاز (TTR) تعریف کردند و توابع هدف را مورد تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی و اقتصادی قراردادند. در سیستم آب شیرین کن، از ۶ متغیر برای بهینه سازی استفاده کرده‌اند و از روش الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی خود بهره بردند و در نهایت

^۱ Multi Effect Desalination with Thermal Vapor Compression

^۲ Top Brine Temperature

موفق شدند بازگشت سرمایه را ۵/۵ درصد بهبود دهند. در کار آنها بررسی تجربی و ساخت آزمایشگاهی و تحلیل تأثیر پارامترها بر روی یکدیگر، مشاهده نمی‌شود.

محبوب و همکاران در سال ۲۰۰۹ یک فناوری آب شیرین ساز جدیدی با ترکیب آب شور و نیروگاه پیشنهاد دادند [۱۶]. آنها برای جلوگیری از هدر رفت انرژی حرارتی نیروگاه‌ها به این فکر افتادند که از این گرما جهت تولید بخار آب برای آب شیرین کن‌های MED استفاده کنند. آنها به تجزیه و تحلیل اقتصادی سیستم پیشنهادی خود تحت بارهای مختلف پرداختند. ترکیب نیروگاه با آب شیرین کن‌های چندمنظوره، بازده حرارتی را از ۴۴ درصد به ۶۳ درصد افزایش می‌دهد. آنها همچنین به کمک این ترکیب حدود ۱۷ درصد مصرف خالص انرژی و ۳۴ درصد هزینه تمام شده را کاهش دادند. در کار آنها بهینه‌سازی و یا بررسی جز به جز المان‌های داخل هر بخش و تأثیر هر کدام بر یکدیگر، مشاهده نمی‌شود و کار آزمایشگاهی انجام نشده است.

کمالی و همکاران در سال ۲۰۰۹ با استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری برای همه انواع فرایندها و به کمک ابزار بهینه‌سازی هزینه، مدلی برای طراحی و بهینه‌سازی MED-TVC ارائه کردند [۱۷]. آنها تمام عوامل مؤثر بر ضرایب انتقال حرارت، دما، فشار، ظرفیت کل و راندمان عملکرد سیستم را در شرایط طراحی و کارکرد پیش‌بینی کردند. آنها حتی طبیعت گذرای دمای در طول فصل‌ها را با یک معادله دیفرانسیل ساده بر اساس بالانس جرم و حرارت مانند مبدل‌ها و ترموکمپرسور مدل کردند؛ و مدل خود را بر اساس داده‌های تجربی تأیید اعتبار کردند. در نهایت آنها دریافتند که افزایش تعداد مراحل، کاهش دمای بخار مرحله اول و افزایش نسبت غلظت نمک موجب افزایش نسبت عملکرد دستگاه می‌شود. همچنین افزایش تعداد مراحل موجب افزایش دبی محرک^۱ نسبت به دبی مکش^۲ می‌شود. آنها نتیجه گرفتند که مبدل صفحه‌ای نسبت به مبدل پوسته-لوله دستگاه را کوچک و قابل حمل می‌کند. در این مقاله آنها به کار آزمایشگاهی و تجربی پرداختند و فقط به مقایسه حالات مختلف دستگاه در کد تأیید اعتبار شده خود بسنده کرده‌اند.

^۱ Motive Steam

^۲ Entrain Steam

شرف و همکاران در سال ۲۰۱۱ به تجزیه و تحلیل انرژی و گرماسنجی یک چرخه ترکیب آلی خورشیدی با فرآیند تقطیر چندمنظوره پرداختند [۱۸]. آن‌ها در کار خود، دو ترکیب مختلف از چرخه‌های خورشیدی با ترکیب‌های مختلف از سیستم (MED) را در نظر گرفته‌اند. در اولین روش، انرژی خورشیدی به‌طور مستقیم از طریق مبدل حرارتی تبخیرکننده به اولین بخش سیستم MED منتقل می‌شود. این فن فقط آب آشامیدنی تولید می‌کند. در روش دوم، انرژی خروجی از توربین سیکل رانکین (ORC) در اولین Effect سیستم MED استفاده می‌شود. در روش دوم برق و آب آشامیدنی تولید می‌شود. آن‌ها در پژوهش خود این دو روش را به کمک تجزیه و تحلیل انرژی باهم مقایسه کردند. مقایسه‌ها بر اساس ۱۰۰ مترمکعب در روز محصول تولیدشده انجام می‌شود. به‌عنوان نتیجه کار آن‌ها، روشی که فقط آب شیرین تولید می‌کند از روش دومی که آب و برق تولید می‌کند به‌صرفه‌تر است. در کار آن‌ها بررسی تجربی انجام نشده است و به بررسی انرژی بسنده شده است. همچنین محاسبه تک‌تک پارامترهای مؤثر در سیستم آب‌شیرین‌کن و نحوه تأثیر هرکدام بر روی باقی متغیرها بررسی نشده است.

شکیب و همکاران در سال ۲۰۱۱ یک آب‌شیرین‌کن MED کوپل شده با توربین گاز را شبیه‌سازی کردند [۱۹]. بخار تولیدشده در توربین گاز از حرارت بازیابی شده استفاده کرده است. (HRSG) به گفته آن‌ها این کوپل آب‌شیرین‌کن با توربین HRSG قبل از کارشان انجام نشده بود. آن‌ها با مطالعه و تحلیل ترمودینامیکی مسئله، به بهینه‌سازی سیستم ترکیبی به کمک دو الگوریتم ژنتیک و الگوریتم جستجوی ذرات پرداختند. همچنین به‌عنوان یک روش نوآورانه یک بهینه‌سازی بر روی توربین گاز و آب‌شیرین‌کن MED انجام دادند و نتایج این بهینه‌سازی‌ها را با یکدیگر مقایسه کردند. اگرچه آن‌ها در کار خود به بهینه‌سازی پرداختند ولی هیچ‌گونه بررسی تجربی و اعتبارسنجی عینی در کار آن‌ها مشاهده نمی‌شود. همچنین تأثیر بخش‌های مختلف این آب‌شیرین‌کن بر روی هم را بررسی نکردند.

ژاو و همکاران در سال ۲۰۱۱ به تجزیه و تحلیل جنبه‌های حرارتی و اقتصادی آب‌شیرین‌کن‌های چندمنظوره (که یکی از فناوری‌های موفق است) با پساب شور پرداختند [۲۰]. آن‌ها در مقاله خود یک

فرایند استفاده مجدد فاضلاب با شوری بالا جهت کاهش هزینه را بررسی کردند. همچنین مدل‌های ریاضی بر اساس تجزیه و تحلیل انرژی و جرم از اواپراتور، کندانسور و نازل‌های پاشش را محاسبه کردند و به بررسی افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و محصولات پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش دمای بخار آب، انتقال حرارت کل سیستم به وضوح کاهش می‌یابد. آن‌ها در پژوهش خود فقط به مدل‌سازی ریاضی بسنده کردند و سراغ ساخت دستگاه و بررسی تجربی آن نرفته‌اند. همچنین بررسی المان‌ها و بهینه‌سازی‌ها نیز انجام نشده است.

سن و همکاران در سال ۲۰۱۱ یک نوع MED با مبدل‌های لوله‌ای عمودی^۱ ساختند [۲۱]. این یک دستگاه مقیاس کوچک با قابلیت افزایش تعداد مراحل برای کاربرد روستایی است. در یک کاربرد روستایی و مقیاس کوچک عواملی همچون بهینه بودن مصرف انرژی، کم بودن سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه نگهداری و در نهایت ساخت و استفاده آسان بسیار مؤثر است. بدین منظور آن‌ها در دستگاه خود از پیش گرم‌ها برای بهینه‌سازی مصرف انرژی و مبدل‌های عمودی برای افزایش ضریب انتقال حرارت ($U=10,000 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$) استفاده کردند تا سطح مورد نیاز انتقال حرارت کاهش یابد و هزینه تمام‌شده کم شود. در این کار آن‌ها تنها به ساخت یک نوع خاص از MED پرداخته‌اند و تحلیل انرژی و بهینه‌سازی صورت نگرفته است. همچنین به مطالعه پارامتری دستگاه پرداختند.

گیود و همکاران در سال ۲۰۱۲ یک فرایند دو مرحله‌ای دمایی نمک‌زدایی جدید را امکان‌سنجی کردند [۲۲]. ایشان مزایای نمک‌زدایی دمایی را راندمان ترمودینامیکی بالاتر، زمان راه‌اندازی کمتر، مصرف مخصوص انرژی کمتر، نرخ رسوب‌گیری کمتر و هزینه سرمایه‌گذاری پایین‌تر عنوان کردند. در این دستگاه آن‌ها برای کاهش هزینه‌ها از خلأ طبیعی استفاده کردند به این صورت که ابتدا محفظه را از آب دریا پر کردند و با بستن راه هوا و باز کردن راه خروج آب، یک خلأ طبیعی به وجود آوردند. این خلأ به علت ستون فشار هوای جوی^۲ و رفت و آمد پیوسته جریان ثابت باقی می‌ماند. البته به‌روزی ۱۵ دقیقه روشن ماندن پمپ خلأ نیاز داشت تا گازهای چگالش نشده را خارج کند. با آنکه انرژی مصرفی

¹ Vertical Tube Evaporator (VTE)

² Barometric head column

برای کاهش فشار کم شده است اما بازهم انرژی گرمایی موردنیاز برای تبخیر آب زیاد است و بخش عمده مصرف انرژی را به خود اختصاص می‌دهد. مصرف مخصوص انرژی دستگاه برای تولید هر کیلوگرم از آب تازه ۱۵۰۰ کیلوژول است که طبق بررسی‌های اقتصادی، هزینه نمک‌زدایی برای تولید آب با استفاده از انرژی اتلافی با قیمت ۳ دلار بر مترمکعب است که اگر از صفحات خورشیدی ارزان‌قیمت برای تأمین انرژی استفاده شود، این هزینه به ۷ دلار بر مترمکعب آب شیرین می‌رسد. در این مقاله تنها به بررسی محاسبات انرژی و هزینه‌ای یک نوع خاص از دستگاه نمک‌زدایی با کمک داده‌های میدانی پرداخته‌شده است و مطالعه پارامتری و محاسبات انرژی صورت نگرفته است. همچنین تلاشی برای بهینه‌سازی دستگاه صورت پذیرفته است.

زاک و همکاران در سال ۲۰۱۳ به بررسی و تجزیه و تحلیل سیستم‌های آب‌شیرین‌کن‌های ترکیبی پرداختند [۲۳]. آن‌ها در مقاله خود، به‌طور خاص با توجه به استفاده از سیستم‌های ترکیبی، به محدودیت‌های فرایند و زمینه‌های بهبود بالقوه، پرداختند. همچنین یک مرور کلی از نمک‌زدایی حرارتی، اسمز معکوس آب دریا (SWRO) ارائه داده‌اند و ملاحظات طراحی و اقتصادی بخش‌های آب‌شیرین‌کن‌های ترکیبی را بررسی کرده‌اند، برای مثال، تنظیمات سیستم، تجزیه و تحلیل‌های اقتصادی را مطالعه کرده‌اند. علاوه بر این بهینه‌سازی سیستم آب‌شیرین‌کن ترکیبی هم بررسی کرده‌اند. ازجمله نواقص کار آنگاه نبود نمونه آزمایشگاهی و بررسی نکردن تجربی سیستم است و فقط به شبیه‌سازی و تحلیل اقتصادی بسنده شده است.

لیانینگ و همکاران در سال ۲۰۱۳ برای رفع تقاضای آب شیرین و برق یک طرح برای تولید برق و آب شیرین پیشنهاد دادند [۲۴]. آن‌ها با ارائه یک مدل ریاضی با استفاده از الگوریتم اصلاح‌شده ژنتیک باهدف حداقل هزینه سالانه، یک مسئله غیرخطی را حل کردند. آن‌ها به‌منظور نشان دادن قابلیت‌های طرح خود، مطالعه موردی را در شهر چینگدائو برای تولید ۲۵۰ مگاوات برق و ۱۲۰۰۰ مگاوات ساعت آب عرضه کردند. نتایج نشان داد که الگوریتم عملیاتی سیستم می‌تواند بر اساس میزان آب موردنیاز تغییر کند. به‌عنوان مثال برای تقاضای آب کمتر از ۸۰۰۰ مترمکعب در ساعت، ترکیب آب‌شیرین‌کن

MSF با توربین گاز انتخاب می‌شود و برای نیاز آب بالاتر از ۸۰۰۰ مترمکعب در ساعت ترکیب آب‌شیرین‌کن MSF و اسمز معکوس با توربین گاز انتخاب می‌شود. آن‌ها در پژوهش خود فقط به ارائه یک مدل ریاضی بسنده کردند و سراغ تحلیل تجربی پارامترها نرفته‌اند. همچنین تأثیربخش نای مختلف بر روی یکدیگر را بررسی نکرده‌اند.

جورجیو و همکاران در سال ۲۰۱۳ یک دستگاه MED که با انرژی خورشیدی کار می‌کرد را طراحی کردند و نتایج یک مرحله^۱ را در حالت بار پاره‌ای^۲ (حضور و عدم حضور نور خورشید) نمایش دادند [۲۵]. به این منظور یک دستگاه MED با مبدل صفحه‌ای یک مرحله‌ای ساختند و آنالیز یک‌بعدی حجم کنترل را نیز انجام دادند. آن‌ها تأثیر تغییر دبی جریان آب دریا و آب گرمایش را بررسی کردند. همچنین عملکرد دستگاه را همراه با توزیع‌کننده جریان و بدون آن نیز برای مبدل صفحه‌ای استفاده‌شده مورد مطالعه قرار دادند. نتایجشان حاکی از این است که اگر از توزیع‌کننده جریان استفاده شود، عملکرد بهتری حاصل خواهد شد، زیرا آب بهتر توزیع شده و سطح بیشتری از مبدل را تر می‌کند. همچنین عنوان کردند که افزایش دبی آب دریا موجب کاهش محصول می‌شود چون نیاز به گرمای آشکار را افزایش می‌دهد. حال آنکه کاهش دبی آب دریا نیز تولید آب شیرین را کاهش خواهد داد زیرا در مبدل نقاط خشک به وجود می‌آید که موجب افت شدید انتقال حرارت می‌شود، این افت انتقال حرارت را مدل یک‌بعدی ایشان نتوانسته بود پیش‌بینی کند. در کار آن‌ها عوامل تأثیرگذار کمی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. همچنین مدل یک‌بعدی مناسبی برای دبی کم آب دریا استفاده نشده است که می‌توانستند با مدل‌های ریاضی مناسب و یا شبیه‌سازی، آن را بهبود دهند.

ژنگ و همکاران در سال ۲۰۱۳ بر روی یک گروه از MED های لوله‌ای خورشیدی تحقیق کردند [۲۶]. این دستگاه از تعدادی لوله بسته و نیم‌بسته درون هم تشکیل شده است که با انرژی خورشیدی گرم شده و هر لوله بسته و نیم‌بسته نقش یک مرحله از MED را بازی می‌کند. این

¹ Effect

² Partial Load

دستگاه می‌تواند با جنسی غیر از آهن مثلاً شیشه نیز ساخته شود. راندمان GOR این دستگاه در حالت یک مرحله‌ای ۰/۷ تا ۰/۸، در حالت دو مرحله‌ای ۱/۴ و در حالت سه مرحله‌ای ۱/۷ بوده است. تولید آب این دستگاه با افزایش دمای کارکرد افزایش می‌یابد. آن‌ها در این کار به مطالعه پارامتری دستگاه خود پرداختند و مدل‌سازی یا شبیه‌سازی صورت نگرفته است و در نتیجه خبری از بهینه‌سازی در کار آن‌ها نیست.

ال موتاز و وزیر در سال ۲۰۱۴ مروری بر دستگاه‌های MED-TVC ساخته‌شده کردند و توسعه این نوع نمک‌زدایی را مورد بررسی قراردادند [۲۷]. آن‌ها MED-TVC را یکی از پرکاربردترین روش‌های نمک‌زدایی عنوان کردند به خاطر مزیت‌هایی چون مصرف انرژی کمتر نسبت به MSF، نسبت عملکرد بالاتر، راه‌اندازی آسان نیاز به تعمیر و نگهداری پایین و هندسه ساده آن. آن‌ها در مقالاتی که عنوان کردند، ادعا می‌کنند که در ساخت دستگاه اگر از استیل ضدزنگ دوبله^۱ بجای SS 316L استفاده شود بهتر است به دلیل مقاومت بالا، هزینه کمتر، مقاومت بهتر در برابر خوردگی و شکاف خوردن. همچنین اگر محل مکش TVC جابجا شود راندمان تغییر خواهد کرد. در ضمن با کاهش بالاترین دمای آب‌شور (TBT)^۲ و افزایش تعداد مراحل اضمحلال‌گرژی کاهش می‌یابد. این کار آن‌ها یک مقاله مروری است که به جنبه‌هایی از تولید و گسترش MED پرداخته است و به تأثیر پارامترهای مختلف و بهینه‌سازی در دستگاه پرداخته است.

نگ و همکاران در سال ۲۰۱۴ بر روی ترکیب سیکل فرایندهای MED و AD^۳ تحقیق کردند [۲۸]. آن‌ها معتقدند که از نظر تئوری برای بهبود راندمان انرژی باید فرایندهای معتبر نمک‌زدایی را ترکیب کرد. در این سیکل‌های ترکیبی علاوه بر بهبود راندمان انرژی، افزایش تولید آب شیرین را می‌توان انتظار داشت. مزیت ترکیب سیکل MED با AD که به اختصار MEDAD نامیده می‌شود این است که می‌توان تولید آب شیرین و برق را هم‌زمان انجام داد. چراکه دستگاه MED از بخار با انرژی پایین و

¹ Stainless Steel Duplex

² Top Brine Temperature

³ Adsorption desalination

دمای کم استفاده می‌کند که می‌تواند به وسیله خروجی گرمای هدر رفت سیکل قدرت یا از طریق انرژی‌های تجدید پذیر به دست آید. نتایج شبیه‌سازی مورد استفاده آن‌ها با اعتبار نتایج آزمایشگاهی روی سیکل ترکیبی MEDAD نشان داد که با کمک مکش بخار در سیکل AD که از MED تأمین می‌شود، آخرین مرحله دستگاه MED می‌تواند در دمای کم‌تر از محیط کار کند و از دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد به ۱۰ درجه برسد. این امر به همراه اختلاف دمای ۲ تا ۲/۵ درجه سانتی‌گراد در بین هر مرحله می‌تواند تعداد مراحل MED را افزایش دهد. در این سیکل ترکیبی تا دو برابر MED های رایج می‌تواند آب شیرین تولید کنند. در این تحقیق تنها به مزایای ترکیب دو سیکل MED و AD پرداخته شده است و هر کدام از آن‌ها به صورت جدا و حتی باهم نیز مطالعه پارامتری نشده‌اند. در نتیجه بهینه‌سازی نیز صورت نگرفته است.

باتاینه در سال ۲۰۱۶ بر روی عملکرد سالانه دستگاه MED-TVC تحقیق کرده است که تولید بخار آن توسط انرژی خورشیدی تأمین شده است [۲۹]. مدل نمک‌زدایی به مدل تولید بخار توسط انرژی خورشیدی، متصل شده تا این مدل توسعه یافته بتواند تولید آب شیرین و مصرف مخصوص سوخت را تعیین کند. این دستگاه برای نواحی ساحلی قطر که از انرژی خورشیدی خوبی برخوردار است در نظر گرفته شده است. تحقیقاتشان نشان داد که برای تولید ۵۰۰۰۰ مترمکعب آب شیرین نیاز است که سطح کلکتورها ۱۰۸۰۰۰۰ مترمربع و ظرفیت ذخیره‌سازی ۷۵ لیتر بر واحد سطح هر کلکتور باشد تا بتواند ۶۸٪ انرژی مورد نیاز را تأمین کند. وی همچنین عنوان کرد که افزایش دمای مرحله اول می‌تواند راندمان کلی دستگاه را افزایش دهد. در این کار شاهد مدل‌سازی ریاضی هستیم و کار تجربی و آزمایشگاهی صورت نپذیرفته است. همچنین تأکید مقاله بر تعداد و نحوه چینش کلکتورهای خورشیدی به منظور تأمین انرژی مورد نیاز در ماه‌های مختلف سال است و تأثیر بخش‌های اضافه شده به آب شیرین‌کن برای اتصال به سیستم خورشیدی را بررسی کرده است، اما عوامل کلی و مجزای دخیل در راندمان و بهینه‌سازی خود دستگاه آب شیرین‌کن به خوبی بحث نشده است.

چوکولانتی و همکاران در سال ۲۰۱۶ بر روی دستگاه نمک‌زدایی تک مرحله‌ای در مقیاس کوچک

کار کردند که از گرمای هدر رفت یک دستگاه $m\text{-CHP}$ ^۱ استفاده می‌کرد [۳۰]. این دستگاه از یک موتور 1KWe استرلینگ برای تولید هم‌زمان برق و بیشتر از ۱۵۰ لیتر در روز آب تازه استفاده می‌کرد. این دستگاه می‌توانست در دو حالت پیوسته^۲ و ناپیوسته^۳ کار کند. در حالت ناپیوسته محفظه اواپراتور به‌طور کامل از آب پر می‌شود و گرما داده می‌شود تا آب آن تبخیر شود. اما در حالت پیوسته آب تا جایی تبخیر می‌شود که به بالای کویل برسد سپس آب‌نمک غلیظ خارج و آب‌نمک جدید وارد خواهد شد تا غلظت نمک در اواپراتور ثابت بماند. در هر دو حالت بیشترین تولید آب شیرین ۷ لیتر در ساعت بود که به‌صورت میانگین دستگاه در حالت ناپیوسته ۱/۳ و پیوسته ۱/۱۶ لیتر بر روز آب شیرین تولید می‌کرد. آن‌ها عنوان کردند که عملکرد دستگاه در حالت پیوسته علیرغم پیچیدگی‌هایش کمتر بود. دلیل این اتفاق را محدودیت‌های فرایندی در غلظت نمک کمتر عنوان کردند. آن‌ها در کار خود تنها به مقایسه دو حالت دستگاه خود بسنده کرده‌اند و شبیه‌سازی و بهینه‌سازی دستگاه خود را انجام ندادند. همچنین تأثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد دستگاهشان را بررسی نکردند.

ژانگ و همکاران در سال ۲۰۱۷ یک سیستم نمک‌زدایی چندمنظوره در جزیره گیشان چین طراحی کردند [۳۱]. آن‌ها بخار آب لازم در آب‌شیرین‌کن را از آب‌خنک کننده یک موتور دیزل ۱۰۰۰ کیلوواتی استفاده کردند که به کمک این سیستم ۶۰ تن آب شیرین در روز تولید می‌شود. آن‌ها ابتدا یک مدل ترمودینامیکی و انتقال حرارتی برای سیستم MED ارائه دادند. سپس یک سیستم نمک‌زدایی یکپارچه طراحی و ساختند. در عمل، دمای تبخیر هر بخش به‌طور خطی با بار گرمایی حاصل از خنک کاری موتور دیزل متناسب است. علاوه بر این، زمانی که بار حرارت به‌تدریج افزایش می‌یابد، دمای تبخیر در هر بخش تقطیر نیز به‌طور خطی افزایش می‌یابد. آن‌ها دریافتند که هنگامی که بار حرارت ژنراتور برق از ۳۰۰ کیلووات تا ۵۳۰ کیلووات افزایش می‌یابد، میزان تولید آب شیرین از ۱/۲۶ مترمکعب در ساعت به ۳۰/۲ مترمکعب در ساعت افزایش می‌یابد. یکی از نقاط ضعف این کار، نداشتن

^۱ Micro Combined Heat and Power

^۲ Continuous operation

^۳ Batch operation

اعتبارسنجی است. همچنین آن‌ها پارامترهای دخیل در سیستم آب‌شیرین‌کن را بهینه‌سازی نکردند و صرفاً به ارائه گزارش خروجی‌ها پرداخته‌اند.

چون‌ها و همکاران در سال ۲۰۱۷ عملکرد سیستم آب‌شیرین‌کن چندمنظوره تحت حالت‌های مختلف تغذیه را مورد تجزیه و تحلیل قراردادند [۳۲]. آن‌ها مدل‌های ریاضی برای تنظیمات طراحی را ارائه داده‌اند. این مدل‌ها برای مطالعه اثر حالت‌های مختلف آب ورودی در رابطه با نسبت خروجی (GOR)، میزان تراکم نازل‌های پاشش، منطقه انتقال حرارت، شوری و حرارت نمک خروجی و مصرف انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که برای سیستم MED با تعداد بخش‌های بالا (۱۰ بخش یا بیشتر)، ۳ یا ۴ گروه آب ورودی لازم است. برای طراحی ۱۱ بخش MED با ظرفیت ۲۵۰۰۰ مترمکعب در روز، بهترین حالت ۳ گروه تغذیه مخلوط شده با بخار آب است. این کار فقط مدل‌سازی ریاضی کرده است و بررسی تجربی و اعتبارسنجی در کار نیست و به شبیه‌سازی‌های عددی بسنده شده است. ضمناً صحبتی از بهینه‌سازی المان‌های مختلف نشده است.

چورک و همکاران در سال ۲۰۱۷ بر روی بهینه‌سازی و عملکرد خارج از شرایط طراحی یک دستگاه MED موجود، متصل با کلکتورهای مسطح خورشیدی تحقیق کردند [۳۳]. آن‌های شرایط مختلف کارکرد دستگاه را آزمایش کردند و موفق شدند رابطه ریاضی تجربی برای تولید آب شیرین دستگاه و نسبت عملکرد^۱ (PR) آن به دست آورند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش دمای بخار کندانسور بیشترین اثر را بر کاهش راندمان گرمایی می‌گذارد. همچنین افزایش دمای آب ورودی بیشترین تأثیر را بر افزایش تولید آب شیرین دارد. در این مقاله آن‌ها فقط به مدل‌سازی ریاضی دستگاه موجود بسنده کرده‌اند و مدل خود را برای نمونه‌های دیگر و یا نمونه‌ای آزمایشگاهی آزمایش نکردند. همچنین می‌توانستند با نوشتن کد کامپیوتری یا شبیه‌سازی نرم‌افزاری بهینه‌سازی دقیق‌تری برای کار خود انجام دهند و عملکرد مدل ریاضی خود را به اثبات برسانند.

سلیمی و عمیدپور در سال ۲۰۱۷ به مطالعه و ارزیابی اقتصادی پارامترهای آب‌شیرین‌کن‌های جفت

¹ Performance Ratio

شده با موتور احتراق داخلی پرداختند [۳۴]. به گفته آن‌ها با توجه به ماهیت حرارتی شیرین سازی چندمنظوره، ادغام آن با یک چرخه قدرت مناسب و استفاده از گرمای خروجی آن برای احیاء حرارت بسیار مطلوب است که ایشان چرخه موتور احتراق داخلی (ICE) را پیشنهاد دادند. همچنین از گرمای آب گرم در مبدل حرارتی برای پیش گرم شدن آب شور استفاده کردند. آن‌ها در مقاله خود، یک مدل ترمودینامیک برای سیستم جفت شده با MED را مورد مطالعه قرار دادند و عملکرد کل سیستم را در نرم افزار متلب کد نویسی کردند و نتایج مدل ترمودینامیکی پیشنهادشده برای موتور توسط کاتالوگ‌ها مورد تأیید بود. با افزایش بار موتور از ۴۰ درصد به ۱۰۰ درصد، تولید آب واحد MED از ۴/۳۸ مترمکعب در روز به ۲۶/۷۸ مترمکعب در روز افزایش می‌یابد و بازده از ۳۱ درصد به ۵۶ درصد افزایش می‌یابد. همچنین آن‌ها ادعا کردند که این یکپارچگی سیستم را ارزان تر می‌کند. آن‌ها در کار خود، نمونه آزمایشگاهی ارائه نکرده و فقط به شبیه سازی عددی بسنده کردند، همچنین نتایج خروجی خود را اعتبارسنجی نکرده‌اند.

فیلیپینی و همکاران در سال ۲۰۱۸ پیکربندی‌های مختلفی از دستگاه‌های MED-TVC و RO را ترکیب کرده و مطالعه کرده‌اند [۳۵]. به این منظور مدل‌های ریاضی برای هر دو سیستم به صورت مستقل به وجود آورده‌اند که هر کدام به صورت جداگانه اعتبارسنجی شده‌اند. سپس مجموع این دو مدل را استفاده کرده است تا کارایی پیکربندی‌های مختلف ترکیب دو دستگاه MED-TVC و RO را بررسی کنند. میزان تولید آب شیرین، مصرف انرژی، خلوص آب شیرین و نسبت بازیافت را به عنوان شاخص‌های عملکرد در مدل ریاضی خود دخیل کرده‌اند. در نهایت به این نتیجه رسیدند که قرار دادن دستگاه RO در بالادست جریان بهترین پیکربندی از نظر میزان و کیفیت تولید آب شیرین و نسبت بازیافت است. این مقاله با تمرکز بر ترکیب دو دستگاه کار شده است و مدل ریاضی برای بهینه سازی هر کدام از دستگاه‌ها صورت نگرفته است. همچنین کار آن‌ها بر پایه مدل سازی ریاضی بوده و کار آزمایشگاهی انجام نشده است.

السید و همکاران در سال ۲۰۱۸ بر روی فرایند MED در حالت پایا و گذرا با مدل‌های تغذیه

متفاوت کارکردند [۳۶]. چهار نوع تغذیه برای دستگاه MED وجود دارد: تغذیه پیشرو (FF)^۱، پسرو (BF)^۲، موازی (PF)^۳ و موازی-مقاطع (PCF)^۴. در تغذیه پیشرو آب دریا از اواپراتور اول وارد شده و بعد از تبخیر قسمتی از آن، باقیمانده آبشور به مرحله بعد می‌رود تا آخرین مرحله، که آب‌نمک غلیظ شده از آن خارج می‌شود. در تغذیه پس‌رو آب دریا از اواپراتور آخر وارد شده و باقیمانده آن به مرحله ماقبل می‌رود تا به اولین مرحله برسد و آب‌نمک غلیظ شده از آن خارج شود. در تغذیه موازی هر اواپراتور به‌صورت مستقل تغذیه‌شده و آب‌نمک غلیظ شده از آن خارج می‌شود. اما در حالت موازی-مقاطع آب دریا به‌صورت مستقل وارد هر افکت می‌شود ولی آب‌نمک غلیظ شده از افکت اول به افکت بعد منتقل می‌شود تا در مرحله آخر خارج شود. آن‌ها یک واحد TVC^۵ نیز به آخرین مرحله موازی-مقاطع اضافه کردند تا مزیت‌های آن را نیز بررسی کنند. نتایج آن‌ها نشان داد که حالت موازی-مقاطع بهترین عملکرد را از نظر نسبت خروجی (GOR)^۶ و مصرف مخصوص حرارت (SHC)^۷ دارد. همچنین اضافه کردن سیستم TVC هزینه‌ها را به حداقل می‌رساند. نتایج حالت دینامیک نیز نشان داد که MED-TVC با تغذیه PCF سریع‌ترین واکنش را به تغییرات نشان می‌دهد درحالی‌که تغذیه پیشرو و پسرو کندترین واکنش را داشتند. هنگامی‌که اغتشاشات در حالت گذرا بر منبع حرارتی اعمال شد، دستگاه با تغذیه BF در معرض خاموشی قرار گرفت به علت غلظت بالای آبشور در اولین اواپراتور. تغییرات در پارامترهای ورودی بیشترین تأثیر را بر کاهش GOR در MED-TVC حادث می‌شد. آن‌ها عنوان کردند که MED-TVC احتیاج به یک سیستم کنترلی قابل‌اعتماد دارد تا از اختلالات عملکرد دستگاه جلوگیری شود. در کار آن‌ها شاهد یک مدل‌سازی کامپیوتری هستیم که به تغییرات عوامل مختلف در نحوه عملکرد دستگاه پرداخته‌شده است بدون این‌که بهینه‌سازی و تحلیل اگزرژی صورت گیرد. همچنین خلأ آزمایش تجربی یا آزمایشگاهی در کار آن‌ها دیده می‌شود.

¹ Forward Feed

² Backward Feed

³ Parallel Feed

⁴ Parallel-Cross Feed

⁵ Thermo Vapor Compresor

⁶ Gain Output Ratio

⁷ Specific Heat Consumption

سعادت‌مند و محمودی در سال ۱۳۸۴ آب‌شیرین‌کن چندمرحله‌ای MED را مدل‌سازی و بهینه‌سازی کردند [۳۷]. آن‌ها به‌منظور بررسی عملکرد این مدل دستگاه‌ها، مدلی ریاضی بر اساس موازنه‌های جرم و انرژی اجزا سیستم نوشتند. همچنین جهت بررسی اثر تغییرات دما بر میزان آب دریای ورودی برای رسیدن به مقدار محصول موردنیاز یک سیستم کنترلی پیشنهاد دادند. با حل دستگاه معادلات مربوط به سیستم، اثرات پارامترهای مهم سیستم همچون تعداد مراحل، دمای بخار ورودی به سیستم و فاکتور غلظت بر روی نسبت بهره‌وری سیستم را بررسی کردند. بر اساس بررسی‌های آن‌ها برای یک آب‌شیرین‌کن MED با ظرفیت ۲۴۰۰ مترمکعب در روز و با توجه به شرایط آب و هوایی کشور اگر تعداد مراحل ۴ و یا ۵ و دمای بخار ورودی به اولین مرحله بین ۶۰-۵۵ درجه سانتی‌گراد لحاظ شود، مقدار بهینه نسبت بهره‌وری بین ۳ تا ۵ می‌آید. کار آن‌ها بر پایه مدل‌سازی‌های ریاضی است و هیچ‌گونه بررسی تجربی و ساخت آزمایشگاهی انجام‌نشده است که این یک کمبود بزرگ در این زمینه است.

عطایی و حیدری در سال ۱۳۹۰ به توسعه مدل بهینه یک سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی بر پایه تبخیر چندمرحله‌ای (SOLAR-MED) پرداختند [۳۸]. آن‌ها یک طرح نوین برای شیرین‌سازی خورشیدی آب دریا پیشنهاد دادند. بطوریکه پس از بررسی حالات مختلف در شیرین‌سازی خورشیدی آب دریا، روش‌های تبخیر چندمرحله‌ای و تبخیر ناگهانی طوری اصلاح کردند که تأمین برق و بخار موردنیاز آن‌ها توسط یک سامانه خورشیدی تولید هم‌زمان برق و گرما صورت می‌پذیرد. با استفاده از نرم‌افزار معتبر ترموفلکس مدل بهینه مربوط به سیستم‌های پیشنهادی را توسعه دادند و با انجام آنالیز حساسیت بر پایه بیشینه‌سازی راندمان انرژی ساختار مربوطه بهینه‌سازی کردند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که با توجه به فرضیات مدل و کلیه جوانب و محدودیات، در بهترین حالت قیمت تمام‌شده هر تن آب شیرین تولیدی در سیستم‌های خورشیدی تبخیر هم‌زمان و تبخیر ناگهانی به ترتیب ۲۳/۳ و ۹۳/۷ دلار خواهد بود که به ترتیب در مقایسه با انواع معمول آن‌ها به ترتیب ۱۰۸٪ و ۵۱۱٪ افزایش نشان می‌دهد. بنابراین طبق گفته آن‌ها، آب‌شیرین‌کن خورشیدی پیشنهادی‌شان بر

مبنای تبخیر چندمرحله‌ای به‌عنوان بهترین انتخاب برای شیرین سازی خورشیدی آب دریا طبق ساختار پیشنهادی تعیین گردید. در کار آن‌ها بررسی تجربی و ساخت دستگاه مشاهده نمی‌شود و به بررسی جز به جز و المان به المان سیستم پرداخته‌اند. همچنین فقط بهینه‌سازی انرژی و ترمودینامیکی انجام داده‌اند و سراغ بهینه‌سازی اجزا سیستم نرفته‌اند و تأثیر هر کدام بر عملکرد بقیه را بررسی نکرده‌اند.

ارجمندی و پاکیزه در سال ۱۳۹۲ به طراحی و مدل‌سازی ریاضی سیستم آب‌شیرین‌کن چندمرحله‌ای MED با قابلیت کاربرد در نیروگاه‌های بخاری و صنایع مشابه پرداختند [۳۹]. آن‌ها در مطالعه خود، برای افزایش راندمان سیستم MED، طرحی جدید ارائه دادند. سیستم جدید ارائه‌شده، مجهز به دو کندانسور و یک مبدل حرارتی بوده و به‌منظور افزایش دمای خوراک ورودی استفاده می‌شود. همچنین با این طراحی جدید، علاوه بر کاهش میزان بخار مصرفی، به‌واسطه چگالش بخار خروجی از فلاش تانک در کندانسور اضافه‌شده به سیستم، میزان آب شیرین تولیدی افزایش می‌یابد. به‌منظور بررسی و مطالعه تأثیر پارترهای مختلف بر روی کارایی فرآیند و ارزیابی عملکرد آن، سیستم جدید با استفاده از نرم‌افزار متلب با در نظر گرفتن روابط موازنه‌های جرم و انرژی، مدل‌سازی ریاضی شده است. نتایج مدل‌سازی آن‌ها نشان می‌دهد که با استفاده از این طرح جدید برای سیستم چندمرحله‌ای با تعداد مراحل پایین، نسبت بهره‌وری بیش از یک واحد و در تعداد مراحل بالا بیش از ۳/۵ واحد افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، دمای بخار ورودی به اولین مرحله ۶۰ درجه سانتی‌گراد انتخاب‌شده است. با توجه به فاکتور غلظت و بازده ترموکمپرسور تعداد مراحل بهینه ۳ مرحله است. در صورتی که سیستم جدید با همان نسبت بهره‌وری قدیم کار کند، با اعمال سیستم جدید، تعداد مراحل به ۲ مرحله کاهش می‌یابد. در پژوهش آن‌ها فقط مدل‌سازی ریاضی شده است و بررسی تجربی و آزمایشگاهی نشده است. همچنین هیچ المانی بهینه‌سازی نشده است و فقط اثر بر روی یکدیگر بررسی شده است.

۲-۲ تاریخچه مطالعات نوع جریان و محاسبات انتقال حرارت

در جریان فالینگ فیلم

به منظور انتقال حرارت در داخل اواپراتور می توان از چندین نوع مبدل استفاده کرد. مبدل های مورد استفاده در دستگاه نمک زدایی MED معمولاً پوسته و لوله اند. حال آنکه مبدل هایی با ضریب انتقال حرارت بیشتر هم استفاده شده اند مانند مبدل های صفحه ای و مبدل های فیلم سیال. در ادامه به تحقیقات صورت گرفته بر مبدل های صفحه ای و جریان فیلم سیال و انتقال حرارت آن پرداخته می شود.

چین و همکاران در سال ۲۰۰۲ یک آزمایش برای محاسبه ضریب انتقال حرارت فالینگ فیلم بر صفحه دولایه طراحی کردند و ساختند [۴۰]. آن ها اثر دبی آب تغذیه، دبی بخار و اختلاف دمای بین آب و بخار را بررسی کردند. آن ها متوجه شدند که در دبی آب کمتر از ۳۵۰ Lit/h نقاط خشک^۱ به وجود می آید. بررسی هایشان نشان داد که کاهش دبی آب تغذیه، افزایش دبی بخار و کاهش اختلاف دما موجب افزایش ضریب انتقال حرارت فالینگ فیلم می شود که بیشترین تأثیر مربوط به کاهش اختلاف دما است.

اوچه و همکاران در سال ۲۰۰۲ سه مدل آرایش لوله های اواپراتور در دستگاه های نمک زدایی را از نظر ضریب انتقال حرارت بررسی کردند [۴۱]. آن ها سه مدل اواپراتور افقی فالینگ فیلم (HFF)^۲، عمودی فالینگ فیلم (VFF)^۳ و عمودی رایزینگ فیلم (VRF)^۴ را مقایسه کردند. در افقی فالینگ فیلم آب دریا بر روی لوله های افقی پاشیده می شود حال آنکه در عمودی فالینگ فیلم، آب بر روی لوله های عمودی جریان می یابد. در هر دو حالت یک فیلم سیال روی لوله تشکیل می شود که در داخل لوله جریان سیال گرم کننده قرار دارد تا آب روی لوله بخار شود. به علت جریان یافتن فیلم

^۱ Dry Spots

^۲ Horizontal Falling Film

^۳ Vertical Falling Film

^۴ Vertical Rising Film

سیال بر روی لوله و نازک بودن آن، ضریب انتقال حرارت در حالت تشکیل فیلم سیال بسیار بیشتر از ضریب انتقال حرارت همان لوله‌ها در حالت شناور در آب است. در حالت رایزینگ فیلم آب‌شور در داخل لوله‌های عمودی است و بخار در خارج از آن است. گرمای منتقل‌شده از سوی بخار موجب به جوش آمدن آب‌شور می‌شود. بخار داخل لوله باعث ایجاد یک فیلم از آب‌شور بر روی دیواره داخلی لوله و بالا رفتن آن می‌شود که درنهایت بخار و آب‌شور در انتهای لوله جدا می‌شوند. آن‌ها عنوان کردند که استفاده از این روش به دلیل بهینه نبودن مرسوم نیست. نتایج کارشان نشان می‌دهد که بیشترین ضریب انتقال حرارت مربوط به عمودی رایزینگ فیلم و بعد مربوط به عمودی فالینگ فیلم است.

کیم و هنگ در سال ۲۰۰۳ یک مطالعه تجربی روی ضریب انتقال حرارت فالینگ فیلم بر روی انواع لوله‌های طرح دار و ساده افقی انجام دادند و اثر آب‌دوستی^۱ سطح لوله‌ها را نیز بررسی کردند [۴۲]. آن‌ها لوله‌های مسی صاف^۲، مارپیچ^۳، راه‌راه^۴ و پره دار کوچک^۵ را مطالعه کردند. همچنین با استفاده از یک عملیات سطح آب‌دوستی با پلازما سطح آن‌ها را آب‌دوست کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که بیشترین انتقال حرارت مربوط به لوله‌های راه‌راه است سپس لوله‌های پره دار کوچک بعد لوله‌های مارپیچ و درنهایت کمترین انتقال حرارت مربوط به لوله‌های صاف است. همچنین آب‌دوست کردن سطح لوله‌ها باعث افزایش خیس شوندگی سطح لوله و جاری شدن آب بر روی لوله‌ها (بجای اینکه به‌صورت قطره‌قطره درآید در هنگامی که عملیات آب‌دوستی صورت نگرفته باشد) می‌شود که این امر موجب کاهش ضخامت فیلم سیال و تر شوندگی حداکثری سطح لوله خواهد شد و ضریب انتقال حرارت را افزایش خواهد داد.

یانگ و شن در سال ۲۰۰۸ انتقال حرارت تبخیر فالینگ فیلم را بر روی لوله‌های افقی به‌صورت تجربی مطالعه کردند [۴۳]. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که هنگامی که دبی بین ۰/۰۶۲ و ۰/۰۱۳

^۱ Hydrophilic

^۲ Plain

^۳ Spiral

^۴ Corrugated

^۵ low-finned

Kg/ms است افزایش دبی باعث افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شود. همچنین با افزایش شار حرارتی و اختلاف دمای انتقال حرارت، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. باوجود مقدار کمی از گازهای کندانس نشده^۱ ضریب انتقال حرارت به‌شدت افت می‌کند. با افزایش دبی ضریب انتقال حرارت آب خالص و آب دریا مانند هم افزایش می‌یابد اما ضریب انتقال حرارت آب دریا به میزان قابل صرف‌نظری کمتر است. و درنهایت آن‌ها دریافتند که با افزایش ارتفاع نازل ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد اما ارتفاع تا یک حد مشخصی می‌تواند افزایش بیابد زیرا از آن به بعد نقاط خشک بر روی سطح لوله پدیدار می‌شود.

ال حسن

لی و همکاران در سال ۲۰۱۱ یک آزمایش انتقال حرارت فالینگ فیلم برای تبخیر در محیط خلأ Pa ۱۰۰۰ طراحی کردند و ساختند [۴۴]. در این شرایط فقط انتقال حرارت کانوکشن رخ می‌دهد. آن‌ها اعداد رینولدز را در بازه ۲۱/۶ تا ۱۰۸/۱ بر روی آرایش شش‌تایی لوله‌های صاف و توسعه‌یافته^۲ آزمودند. نتایج ایشان نشان داد که لوله‌های با افزایش سطح در داخل و خارج لوله انتقال حرارت بیشتری دارند. آن‌ها یک کورولیشن نیمه‌تحلیلی^۳ برای پیش‌بینی ضریب انتقال حرارت لوله‌های صاف با در نظر گرفتن سطوح کاملاً خیس شده و نیمه‌خشک تولید کردند. همچنین برای لوله‌های توسعه‌یافته نیز یک نسبت افزایش انتقال حرارت نسبت به لوله‌های صاف را کورولیشن کردند.

لی و همکاران در سال ۲۰۱۲ یک تحقیق تجربی بر روی تأثیر یک‌لایه‌ی متخلخل با مقیاس میکرو برای ترشوندگی و انتقال حرارت لوله‌های افقی در جریان فالینگ فیلم انجام دادند [۴۵]. به این منظور یک‌لایه پودر مس بر لوله‌های مسی پاشیدند و آن را در کوره پختند. نتایج نشان داد که با اضافه کردن این پوشش تمام سطح لوله خیس شد حتی در دبی‌های پایین به علت اعمال نیروی کپیلاری^۴ بیشتر درحالی‌که قبل از آن نیمی از لوله‌های صاف را آب خیس می‌کرد. لذا ضریب انتقال حرارت به دلیل

¹ Non-condensing gases

² Enhanced

³ Semi-analytical correlation

⁴ Capillary

افزایش سطح خیس شونده و نازک شدن فیلم سیال دو برابر شد.

بوستامانته و گاریملا در سال ۲۰۱۲ روی مکانیزم غالب تبخیر فالینگ فیلم و قطره‌ای بر روی مجموعه‌ای از لوله‌های مستطیلی که نمایانگر سطوح خارجی میکرو کانال‌ها هستند تحقیق کردند [۴۶]. آن‌ها جریان را با دوربین سرعت بالا به تصویر کشیدند و با استفاده از تکنیک آنالیز تصاویر توانستند پهناء، مساحت سطح، حجم، سرعت و فرکانس قطره را بسنجند. نتایجشان نشان داد که فرکانس قطره با افزایش نرخ دبی جرمی به صورت خطی افزایش می‌یابد، اما دوره زمانی بین ضربه‌ها رفتار تصادفی نشان می‌دادند. پهناء، مساحت، حجم و سرعت قطره‌ها چندان تحت تأثیر رینولدز جریان نیستند، اما سرعت در لوله‌های پایینی افزایش پیدا می‌کرد.

آبراهام و مانی در سال ۲۰۱۴ یک بررسی تجربی بر تأثیر پاشش ذرات آلومینیومی روی لوله‌های آلومینیومی بر روی ضریب انتقال حرارت فالینگ فیلم سیستم MED انجام دادند [۴۷]. گرمای داخل لوله‌ها به صورت کانداکشن به فیلم آب روی لوله‌ها انتقال می‌یابد سپس به وسیله کانوکشن تبخیر صورت می‌گیرد. انتقال حرارت در فالینگ فیلم قابل پیش‌بینی نیست به علت ذات غیرقطعی پدیده فالینگ فیلم مانند ضخامت آن و خشک شدن بعضی قسمت‌ها. آن‌ها عنوان کردند که اسپری پوشش آلومینیومی به سطح لوله‌های صاف باعث به وجود آمدن سطح متخلخل^۱ شده و انتقال حرارت را به دلیل افزایش توربولانس، کاهش ضخامت فیلم و احتمال وقوع جوشش هسته‌ای بهبود می‌بخشد. نتایجشان نشان داد که بهترین عدد Re فالینگ فیلم برای انتقال حرارت ۴۰۰ است و لوله‌های پوشش دارد ضریب انتقال حرارت بین ۷۵ تا ۱۵۰ درصد بیشتر از لوله‌های بدون پوشش دارند.

کی و همکاران در سال ۲۰۱۸ عملکرد انتقال حرارت لوله‌های مارپیچ شیاردار^۲ را در تبخیر فالینگ فیلم مورد مطالعه تجربی قرار دادند و با لوله‌های صاف مقایسه کردند [۴۸]. نتایج آن‌ها نشان داد که لوله‌های مارپیچ ۳۵٪ بیشتر از لوله‌های صاف انتقال حرارت داشتند. همچنین قابلیت ضد رسوب لوله‌های مارپیچ اندکی بهتر از لوله‌های صاف بود. رسوب لوله‌های مارپیچ نازک‌تر و با چسبندگی کمتر

^۱ Porous surface

^۲ Spiral grooved

بود همچنین دیرتر تشکیل می‌شدند و بهتر پاک می‌شدند.

دینگ و همکاران در سال ۲۰۱۸ روی رفتار آرام فالینگ فیلم در حالت قطره‌ای و حالت جت پاشش آب روی لوله‌های افقی مطالعه کردند [۴۹]. رفتار جریان فالینگ فیلم تأثیر زیادی بر روی انتقال جرم و حرارت در جاذب‌ها واپراتورها دارند. در این تحقیق از یک مدل سه‌بعدی متقارن به کمک روش VOF برای شبیه‌سازی در CFD استفاده شده است. درنهایت نتایجشان نشان داد که سطح تر شده اولیه تأثیر زیادی در الگوی جریان می‌گذارد. همچنین مشخص شد که سطح نهایی تر شده وابسته به زاویه تماس سرازیری است، به همین دلیل تعریف زاویه تماس دینامیک بهترین دستاورد برای دقیق مشخص کردن رفتار فالینگ فیلم است.

یان و همکاران در سال ۲۰۱۹ بر روی خصوصیات جریان سیال و انتقال حرارت فالینگ فیلم روی دسته‌ای از لوله‌های افقی یک مطالعه تجربی انجام دادند [۵۰]. آن‌ها اثر دبی آب، شار حرارتی و آرایش پاشش نازل‌ها را بر روی سه لوله زیر هم بررسی کردند. آن‌ها نوع حرکت فیلم سیال را بروی لوله‌ها با سه دبی مختلف عکس‌برداری کردند. نتایجشان نشان داد که بیشترین انتقال حرارت مربوط به لوله اول است بعد لوله دوم و کمترین انتقال حرارت مربوط به لوله سوم است. همچنین اگر تمام سطح لوله تر شود ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد لذا نقش آرایش و نوع نازل‌ها در به وجود آمدن فیلم سیال و افزایش ضریب انتقال حرارت کلیدی است.

۲-۳ نوآوری پژوهش

نوآوری در این پروژه به دست آوردن نمودار ضریب انتقال حرارت جابجایی برحسب رینولدز در جریان فالینگ فیلم در رینولدزهای پایین است که این محدوده برای طراحی MED مقیاس کوچک و متوسط کاربرد دارد. بدین منظور نمونه آزمایشگاهی کوچک MED ساخته شده و برای محاسبه ناسلت در توان‌های حرارتی مختلف و دبی‌های ورودی مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج این

تحقیق می‌تواند کمک شایانی به محاسبه عدد ناسلت موردنیاز برای طراحی مبدل فالینگ فیلم کند. این نمونه شامل یک اواپراتور و کندانسور است و انرژی موردنیاز آن توسط شار الکتریکی اعمالی به لوله‌های مبدل لوله‌ای فالینگ فیلم تأمین می‌شود تا بتوان شار حرارتی را در حالت‌های مختلف تنظیم و کنترل کرد. در مطالعات کمی از این روش برای انتقال حرارت استفاده شده است. مزیت این روش به وجود آوردن شار حرارتی یکنواخت و تأثیر کم آن بر اختلال سنسورهای دما است. لذا می‌توان اعداد ناسلت را با دقت بالاتری گزارش کرد.

فصل ۳: روش تحقیق و اندازه گیری و نحوه انجام

آزمایش

در این فصل به بررسی سیستم شیرین سازی به روش تقطیر چند اثره (MED) با استفاده از روش آزمایشگاهی پرداخته شده است. از جمله مزیت‌های این پژوهش، مطالعه دقیق و تجربی پارامترهای حساس و مؤثر بر فرایند شیرین سازی MED به کمک ساخت ست‌آپ کامل آزمایشگاهی می‌باشد. تأکید می‌شود این نوع مطالعه MED به شکل تجربی و پارامتری تاکنون انجام نشده است و در ادامه اشاره می‌شود که این طرح چه مزایایی خواهد داشت.

در این فصل اجزاء دستگاه و طرز کار آن و همچنین روش تحقیق شرح داده شده است. داده‌های به دست آمده از آب شیرین کن به روش تجربی محاسبه می‌شود. تجزیه و تحلیل این داده‌های تجربی در فصل چهارم این پژوهش آورده شده است.

همانطور که در فصل‌های قبل بیان شد روش‌های متفاوتی برای شیرین سازی آب وجود دارد. اما آنچه یک روش را از بقیه روش‌ها متمایز می‌کند، آسان‌ترین و ارزان‌ترین روش ممکن با توجه به موقعیت آن منطقه می‌باشد. در بسیاری از مواقع تأمین آب شرب مصرفی و یا آب مقطر در حجم و ابعاد بالا با مشکلاتی روبه‌رو می‌شود. این مشکلات شامل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بالا، آسیب‌پذیری از نظر امنیتی و استراتژیک، افزایش هزینه‌های نگهداری و افزایش هزینه انتقال یا بسته‌بندی آب به-عنوان محصول است. از آنجا که این دستگاه‌ها تاکنون بیشتر برای مقیاس بزرگ (بیشتر از ۱۰۰۰ مترمکعب در روز) طراحی و ساخته شده‌اند، برای طراحی بهینه در مقیاس کوچک با کمبود اطلاعات مواجه هستیم و تحقیقات کمی در این زمینه صورت گرفته است. لذا بسیار مورد نیاز است که با کسب اطلاعات فنی و معتبر، برای تأمین آب شرب مصرفی مکان‌های کم‌جمعیت یا کارخانه‌های کوچک نیز دستگاه آب‌شیرین‌کن MED مقیاس کوچک^۱ ساخته شود. که در این پژوهش به این مهم پرداخته می‌شود.

نمای کلی ست‌آپ آزمایشگاهی در شکل ۳-۱ نشان داده شده است. با توجه به مجموعه آزمایشگاهی که در شکل مشاهده می‌شود، پارامترهای زیر قابلیت این را دارا می‌باشند که در محدوده

¹ Small scale

معناداری تعیین و به صورت تجربی مطالعه شوند:

- ۱- غلظت آب شور ورودی به مجموعه (مطالعه پدیده رسوب در افکت های آب شیرین کن)
- ۲- دمای آب شور ورودی به مجموعه (دمای پیش گرم کن^۱)
- ۳- دبی آب شور ورودی به مجموعه (امکان مطالعه رژیم های قطره ای^۲، ستونی^۳ و پرده ای^۴)
- ۴- نوع پاشش (مه پاش، سوزنی، معمولی)
- ۵- فاصله پاشش
- ۶- آرایش و تعداد نازل ها (امکان بررسی انتقال حرارت لوله های کاملاً خیس^۵، نیمه خیس^۶ و خشک)
- ۷- فشار خلاء^۷ داخل افکت
- ۸- جنس و مشخصات هندسی لوله های اوپراتور (امکان تغییر ضخامت، قطر و طول لوله)
- ۹- فاصله لوله های اوپراتور
- ۱۰- شارحرارتی اعمال شده به لوله ها (امکان تغییر دمای سطح لوله و ضریب انتقال حرارت جابجایی)
- ۱۱- تغییر دبی آب شور پسماند^۸
- ۱۲- تغییر دبی آب شیرین استخراج شده^۹
- ۱۳- تغییر دما و دبی آب کندانسور

¹ Pre heater
² Droplet
³ Jet
⁴ Sheet
⁵ Fully wet
⁶ Partial wet
⁷ Vacuum pressure
⁸ Brine
⁹ Fresh water



شکل ۱-۳ نمای کلی ستاپ آزمایشگاهی

جهت سهولت در آدرس دهی، بخش های مختلف دستگاه را مطابق شکل ۳-۲ شماره گذاری می کنیم.

بخش ۱ : پیش گرم کن

بخش ۲ : اواپراتور

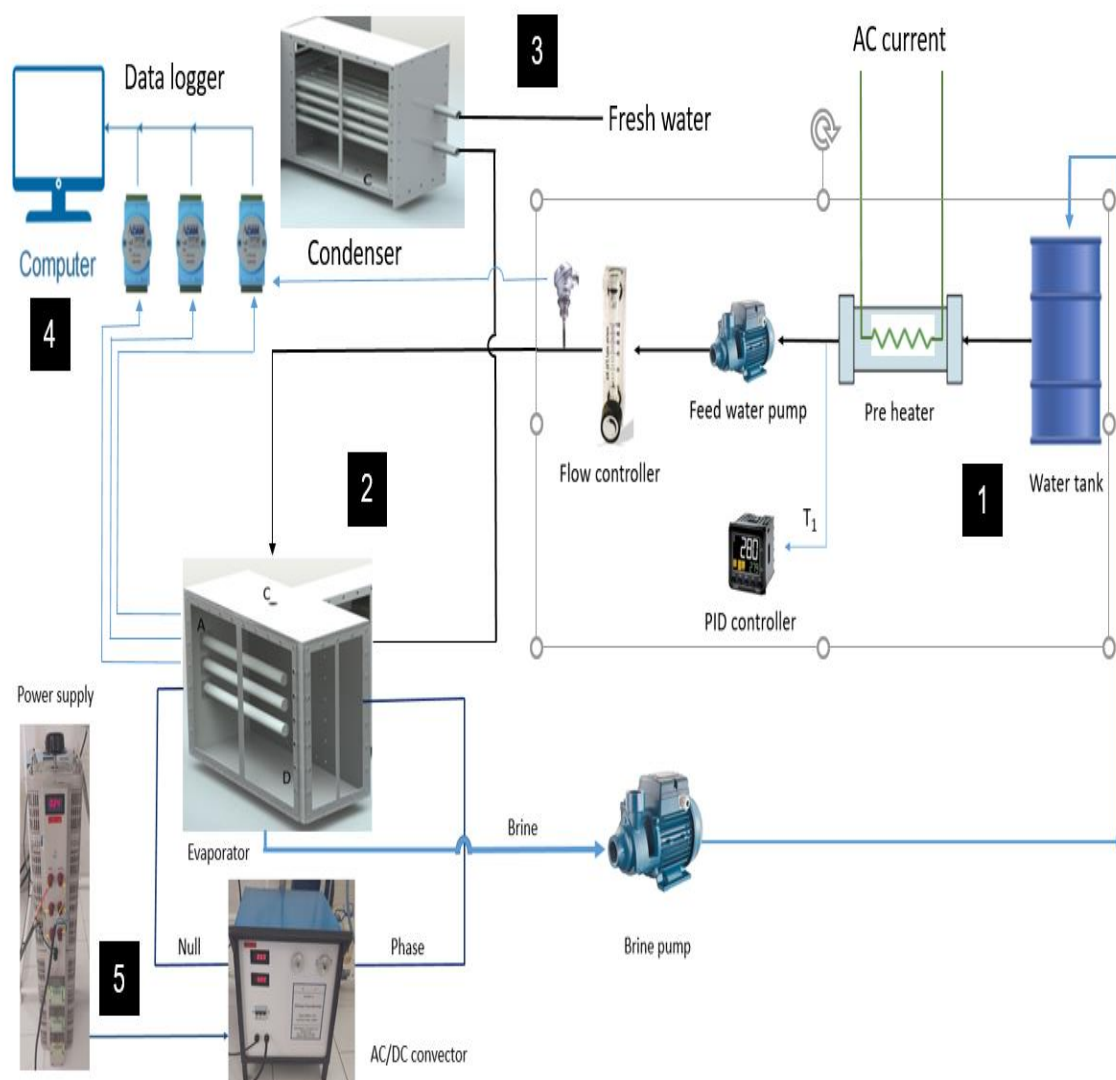
بخش ۳ : کندانسور

بخش ۴ : دستگاه ثبت داده ها

بخش ۵ : منبع تغذیه و دستگاه ترانس

۳-۱ پیش گرم کن

به منظور افزایش دمای آب شور ورودی نیاز است تا با استفاده از پیش گرم کن و با توجه به فشار های مختلفی که در افکت اعمال می شود (رجوع به جداول ترمودینامیکی آب) اقدام به گرم کردن آب شود.



شکل ۳-۲ شماتیک دستگاه آزمایش

برای این کار در درجه اول نیاز به مخزن ذخیره سازی آب شور است. در این آزمایش از مخزن پلی اتیلن با ظرفیت ۳۵۰ لیتری استفاده شده است. این مخزن قادر به تحمل دمای آب تا ۸۵ درجه

سانتی گراد می‌باشد. در این ست‌آپ برای گرم کردن آب مطابق شکل ۳-۳ از یک مجموعه المنت شامل سه عدد المنت ۲ کیلوواتی (در مجموع ۶ کیلووات) که به صورت ضدآب و با آرایش ستاره به یکدیگر متصل شده اند، استفاده شده است. این مجموعه داخل مخزن ۳۵۰ لیتری آب قرار می‌گیرد. یک سنسور دمای مقاومتی از نوع PT100 به صورت مداوم دمای آب مخزن را اندازه گیری می‌کند.



شکل ۳-۳ مجموعه مخزن و المنت (الف) المنت در خارج آب
(ب) المنت در داخل مخزن آب

برای کنترل کردن زمان خاموش و روشن شدن المنت ها از یک مجموعه کنترلر PID^۱ متشکل از یک رله سه کنتاکتی ساخت شرکت Gasim و یک کنترلر دمایی و نمایشگر فرایند شرکت Omron ژاپن مدل E5CC استفاده شده است. (مطابق شکل ۳-۴)



(ب)



(الف)

شکل ۳-۴ الف) نمایشگر (ب) مجموعه کنترلر مدل E5CC

محدوده دمایی این مدل از ۲۰۰- تا ۲۳۰۰ درجه سانتی گراد و نرخ نمونه برداری آن ۵۰ میلی ثانیه



شکل ۳-۵ رله سه کنتاکت مدل 60.13

^۱) PID (proportional-integral-derivative controller

می‌باشد. به عبارت دیگر هر ۵۰ میلی ثانیه دمای منبع را از طریق سنسور PT100 چک می‌کند و با قطع و وصل متناوب جریان عبوری از المنت ها (تغییر جهت تیغه های بوبین در رله) دمای منبع را در دمای تنظیم شده نگه می‌دارد. رله سه کنتاکت نیز از نوع N.O.^۱ می‌باشد که با قطع برق، فرمان



شکل ۳-۶ پمپ آب شور مدل PM45 با توان نیم اسب

باز شدن مدار را اجرا می‌کند.

با نصب پمپ پنتاکس با قدرت نیم اسب، آب پس از عبور از مجموعه پیش‌گرم‌کن به سمت اواپراتور (تبخیر کننده) پمپاژ می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که در مدل پمپ استفاده شده آب بند از نوع فیبر و فنر و پروانه از جنس برنج می‌باشد که می‌تواند سیال با دمای حداکثر ۸۰ درجه سانتی گراد را تحمل کند.

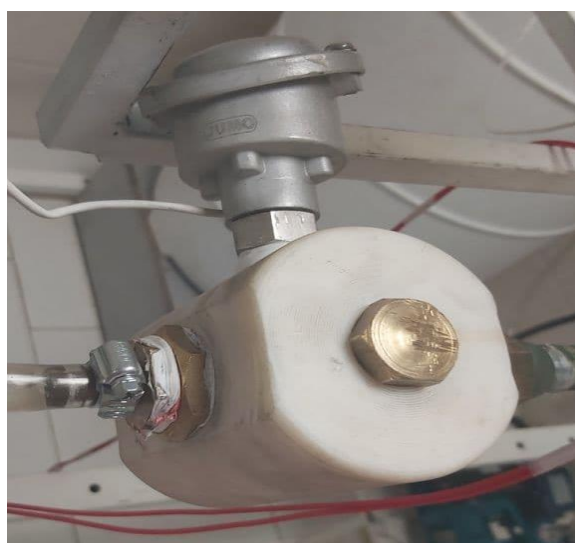
با استفاده از یک روتامتر شیشه ای شیر دار، که در مسیر آب و بعد از پمپ آب شور قرار دارد دبی حجمی آب پیش از ورود به محفظه اواپراتور تنظیم می‌شود. (شکل ۳-۷) این روتامتر ساخت شرکت Madeco بوده و دارای محدوده اندازه گیری ۲ تا ۱۸ لیتر بر دقیقه است. دقت اندازه گیری این ابزار ۰/۵ لیتر بر دقیقه است.

^۱ Normally open



شکل ۳-۷ روتامتر شیشه ای

قبل از ورود آب به تبخیر کننده از یک اتصال پلی آمید و یک سنسور مقاومتی PT100 پراب دار ساخت شرکت Jumo آلمان که بر روی این اتصال نصب شده است استفاده می شود تا دمای آب شور قبل از ورود به سیستم اندازه گیری شود. دقت این سنسور ± 0.1 درجه سانتی گراد است.



شکل ۳-۸ اتصال پلی آمید و سنسور مقاومتی

۳-۲ اواپراتور

حساس‌ترین بخش کار، طراحی و ساخت اواپراتور است. آب شوری که در قسمت قبل پیش‌گرم شده است با عبور از مجموعه نازل‌ها بر روی لوله‌های داغ اواپراتور پاشش می‌شود. در این مجموعه ارتفاع پاشش متغیر بوده و از ۰/۵ تا ۱۰ سانتی متری لوله‌ها قابل تغییر است. نوع نازل و همچنین تعداد نازل‌ها نیز متغیر است. با توجه به درگاه‌های تعبیه شده می‌توان نوع نازل‌ها را تغییر داد و تعداد آن‌ها را کم و زیاد کرد (قابلیت بررسی انتقال حرارت در لوله‌های کاملاً خیس، نیمه خیس و خشک).



شکل ۳-۹ انواع مختلف نازل‌ها

پس از بررسی نوع پاشش نازل‌ها، بهترین نازل از نظر نوع پاشش و توزیع آب روی لوله‌ها انتخاب می‌شود. همانطور که در شکل ۳-۱۰ قابل مشاهده است، این نازل از نوع متمرکز با قطر ۱ میلی متر است.



شکل ۳-۱۰ نازل متمرکز

طول مفید لوله های اواپراتور ۴۰ سانتی متر است. قطر این لوله ها ۱ اینچ و ضخامت آن ها ۰/۳ میلی- متر می باشد و جنس آن ها از استیل ضد زنگ ۳۱۶ برآق^۱ است. تعداد آن ها ۳ عدد و آرایش آن ها خطی است. فاصله مراکز این لوله ها از یکدیگر ۵ سانتی متر است که می توان با تغییر محل اتصال لوله ها تأثیر فاصله ۳ سانتی متری را نیز تست کرد. جریان برق خروجی از ترانسفورماتور مستقیماً وارد لوله بالایی شده و بعد از آن به صورت سری با اتصال بست های استیل، به لوله های زیرین وارد شده و توان حرارتی لازم ایجاد می گردد.

با تغییر جنس، ابعاد هندسی و فاصله لوله ها از یکدیگر می توان تأثیر هر کدام از این پارامتر ها را در ضریب انتقال حرارت جابجایی (h) و عدد ناسلت (Nu) بررسی کرد.

ابعاد محفظه اواپراتور ۳۵×۲۲×۵۰ سانتی متر (طول×عرض×ارتفاع) می باشد و جنس ورق های آن از آهن با ضخامت ۳ میلی متر است. نقشه ساخت این محفظه ابتدا با استفاده از نرم افزار Solidworks طراحی شده است و سپس ورق های آن توسط فرایند لیزر، برش کاری و پس از آن جوشکاری شده است. برای جلوگیری از زنگ زدگی محفظه، تمام قسمت های بدنه آن ابتدا تحت عملیات ماسه پاشی^۲ قرار گرفته و سپس با فرایند رنگ کوره رنگ آمیزی شده است.

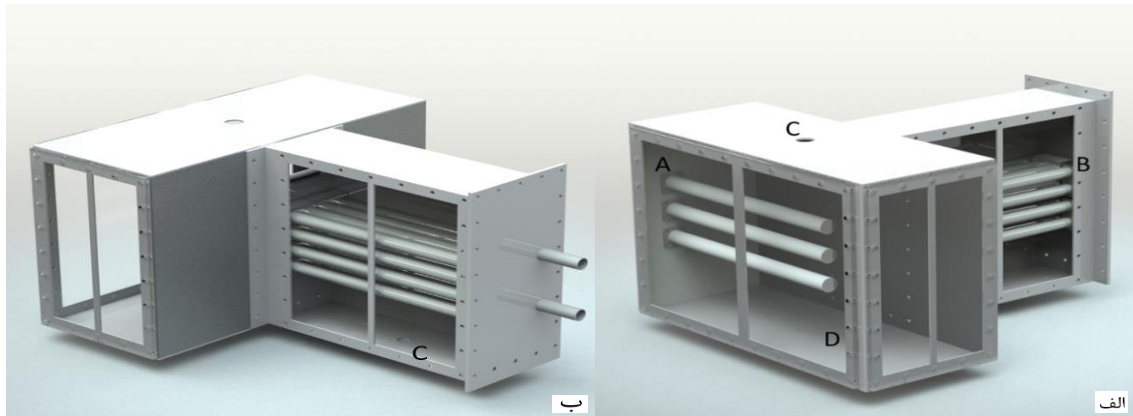
برای مشاهده داخل تبخیرکننده دو وجه از این محفظه با ورق شفاف پلکسی به ضخامت ۶ میلی- متر پوشانده شده است. ورق های پلکسی توسط ۵۴ عدد پیچ ۳ سانتی متری سایز ۶ بر روی محفظه اصلی طوری پیچ می شود که مجموعه ای بدون درز و با قابلیت ایجاد خلاء ساخته شود. از گسکت سیلیکونی به عنوان واسط و آببند بین ورق های آهنی و پلکسی استفاده شده است. از دو ساپورت عمودی برای جلوگیری از خم شدن پلکسی ها حین عملیات وکیوم استفاده شده است.

مطابق شکل ۳-۱۱ الف) آب پس از عبور از پیش گرم کن، از ورودی C وارد محفظه اواپراتور می شود و از طریق نازل ها روی لوله های اواپراتور پاشش می شود. بخشی از آب بخار شده و با عبور از دریچه

¹ Stainless steel 316

² Sand blast

تعبیه شده در پشت اواپراتور وارد بخش کندانسور می‌شود. مابقی آبی که بخار نشده است تحت عنوان آب غلیظ شده یا پساب از خروجی D خارج شده و توسط پمپ پسماند^۱ به منبع آب هدایت می‌شود. بخار آب حاصل از تبخیر به دلیل وجود گرادیان فشار وارد محفظه کندانسور می‌شود.



شکل ۳-۱۱ الف) محفظه اواپراتور ب) محفظه کندانسور
(A اواپراتور، B کندانسور، C ورودی آب تغذیه، D خروجی آب شور تغلیظ شده)

۳-۳ کندانسور

مطابق شکل ۳-۱۱ قسمت ب) محفظه کندانسور دارای ۱۶ عدد لوله استیل با قطر ۱۶ میلی‌متر و طول ۳۰ سانتیمتر است که با آرایش ۴×۴ ساخته شده است. در این قسمت از دستگاه ابتدا آب سرد به کمک پمپ پنتاکس با توان نیم اسب و از مدل PM45 وارد لوله‌های کندانسور می‌شود. از طرف دیگر، بخار خروجی از اواپراتور بر روی این لوله‌ها جریان پیدا می‌کند و به‌صورت فالینگ فیلم بر روی لوله‌ها کندانس می‌شود و در نتیجه آب داخل لوله‌ها گرم می‌شود و از خروجی کندانسور خارج می‌شود. بخار کندانس شده به عنوان آب شیرین^۲ یا آب مقطر از پایین محفظه کندانسور خارج می‌شود. در بخش پایینی کندانسور شیر ربع‌گردی تعبیه شده است تا آب حاصل از کندانس بخار پس از رسیدن به ارتفاعی مشخص از کف محفظه کندانسور تخلیه شود.

در بخش پایینی لوله‌های کندانسور درگاهی تعبیه شده است تا با اتصال آن به پمپ وکیوم و ایجاد گرادیان فشار (ایجاد خلاء) در سیستم، بخار حاصل از تبخیر از روی لوله‌های کندانسور عبور داده

^۱ Brine pump

^۲ Fresh water

شود. از پمپ وکیوم برای ایجاد خلاء در محفظه اواپراتور و کندانسور استفاده می‌شود. این پمپ از برند Mastercool مدل 90066 با توان یک اسب بخار می‌باشد. این پمپ قادر است تا فشار های مطلق تا ۰/۲ بار را ایجاد کند. از یک گیج عقربه ای از برند BETA و با دقت ۰/۰۲۵ بار برای نشان دادن فشار داخل محفظه استفاده می‌شود. ایجاد فشار خلاء در محفظه به ما کمک می‌کند تا آب را در دماهایی پایین تر از نقطه تبخیر اتمسفری تبخیر کنیم. (با توجه به شرایط ترمودینامیکی)

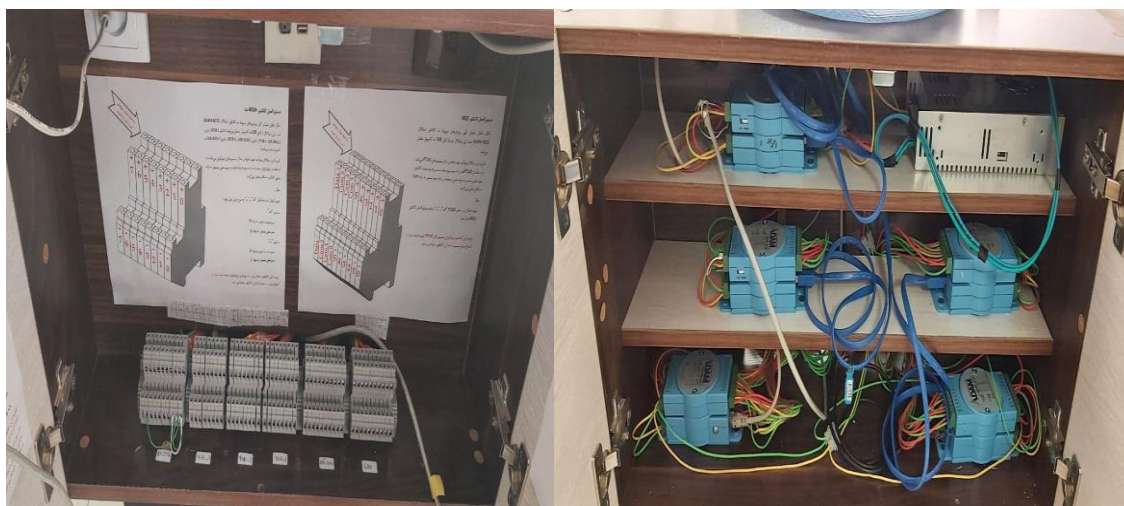


شکل ۳-۱۲ (الف) گیج فشار Beta (ب) پمپ وکیوم مدل 90066

۳-۴ دستگاه ثبت داده ها

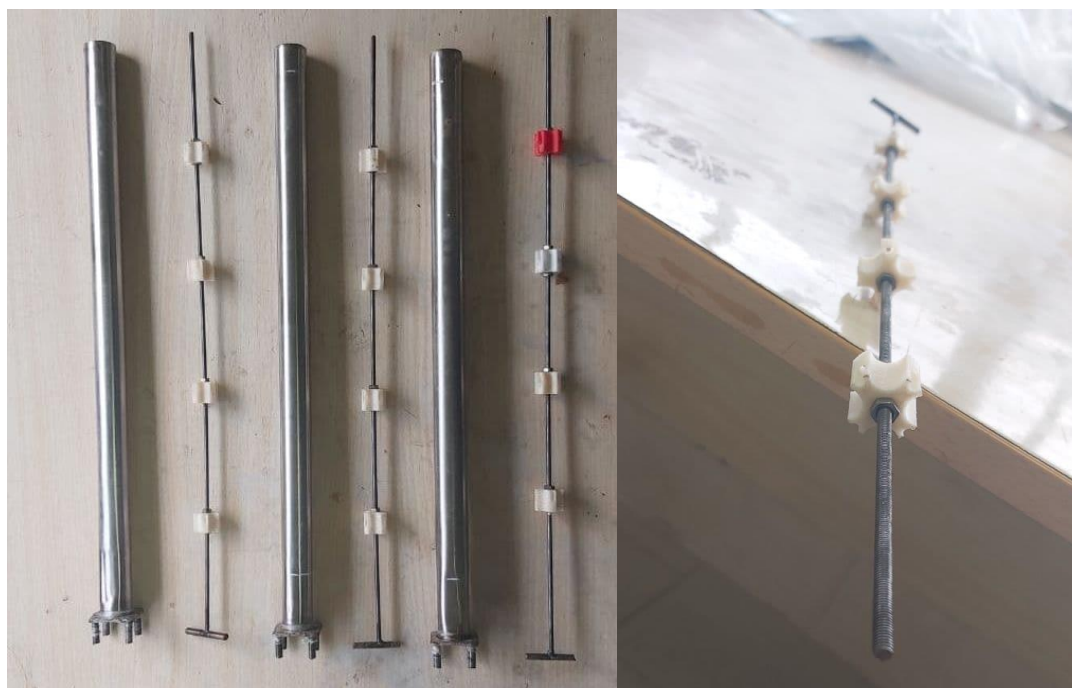
مطابق شکل ۳-۱۳ برای ثبت داده های آزمایش از دستگاه دیتالاگر ساخت شرکت ادونتک^۱ تایوان استفاده می‌شود. برای ثبت دماهای سیستم از ترموکوپل نوع K استفاده شده است که به دستگاه ADAM4018 متصل شده است. مشخصات این سنسور در سند کالیبراسیون در پیوست (ب) درج شده است. این سنسورها در وسط لوله‌های اواپراتور و داخل لوله نصب شده‌اند و قابلیت جابجایی زاویه ای و محوری دارند و به این ترتیب می‌توان دمای نقاط مختلف سطح لوله را در مقاطع و زاویه های مختلف مشاهده کرد و تغییرات ضریب انتقال حرارت و همچنین عدد ناسلت را در این نقاط محاسبه کرد. در نهایت با استفاده از فرمول های میانگین می‌توان مقادیر ضریب انتقال حرارت متوسط و عدد ناسلت متوسط را در آن عدد رینولدز محاسبه کرد.

¹ Advantech Co.



شکل ۳-۱۳ دستگاه دیتالاگر

از آنجا که طول لوله های اواپراتور ۴۰ سانتی متر می باشد، سنسور ها را با فاصله ۱۰ سانتی متر از یکدیگر داخل لوله ها قرار می گیرند. لذا داخل هر لوله ۴ عدد سنسور و در مجموع از ۱۲ عدد سنسور دمایی استفاده می شود.



شکل ۳-۱۴ وضعیت قرارگیری ترموکوپل ها داخل لوله

۳-۵ منبع تغذیه

تأثیر شار حرارتی با استفاده از یک دستگاه ترانسفورماتور کاهنده که می‌تواند برق سه فاز ۳۸۰ ولت AC^۱ را به ۱۲ ولت DC^۲ تبدیل کند، بررسی خواهد شد. این دستگاه امکان اعمال توان حداکثر ۶ کیلووات به دستگاه را خواهد داشت که با توجه به توان قابل تحمل لوله‌ها، محدوده آزمایش دستگاه در بازه ۱ تا ۳ کیلووات خواهد بود. به این ترتیب می‌توان تأثیر تغییر شار حرارتی بر ضریب انتقال حرارت جابجایی فالینگ فیلم را بررسی کرد. جریان برق خروجی از ترانسفورماتور مستقیماً وارد لوله بالایی شده و بعد از آن به صورت سری با اتصال بست‌های استیل به لوله‌های زیرین وارد شده و بر اساس تنظیم ولتاژ، جریان برق در لوله‌ها به وجود می‌آید و توان حرارتی لازم اعمال می‌شود.



شکل ۳-۱۵ (الف) منبع تغذیه سه فاز (ب) دستگاه ترانس کاهنده

¹ Alternative current

² Direct current

۳-۶ تحلیل عدم قطعیت

هر کدام از تجهیزات اندازه‌گیری که در قسمت های قبل معرفی شد، دارای دقت مشخصی می‌باشند. در این قسمت با توجه به دقت هر وسیله و با استفاده از روش های آماری که توضیح آن‌ها در پیوست (د) آمده است، تحلیل عدم قطعیت برای مؤلفه های آزمایش انجام می‌شود.

بر همین اساس می‌توان گفت مولتی‌متر با دقت $\pm 0.1\%$ مقدار نمایشگر، کنترل‌کننده ولتاژ با دقت $\pm 1\%$ ولت، روتامتر با دقت $\pm 1\%$ لیتر بر دقیقه، سنسور دمای PT100 با دقت $\pm 1\%$ درجه سانتی‌گراد، سنسور دمای نوع K با دقت $\pm 0.8\%$ درجه سانتی‌گراد، گیج فشار با دقت $\pm 0.2\%$ بار و دستگاه ثبت داده ها با دقت $\pm 0.1\%$ کل بازه اندازه‌گیری، داده های موردنظر را اندازه‌گیری می‌کنند.

همچنین روش آماری مورد استفاده در این مطالعه به منظور اطمینان از تکرارپذیری آزمایش ها، روش فاصله اطمینان است. به همین منظور در این مطالعه تمام آزمایش ها به منظور صحت سنجی بهتر سه مرتبه تکرار گردیده و مطابق با رابطه زیر، با فاصله ی اطمینان ۹۵ درصدی مدنظر قرار گرفته است:

$$\alpha = \bar{x} \pm \left[4.303 \times \frac{\theta}{\sqrt{m}} \right] \quad (3-1)$$

در معادله فوق $\bar{x}$ مقدار متوسط داده ها، θ انحراف معیار، m تعداد تکرار و مقدار 4.303 ضریب تعمیم است که با استفاده از جدول ضرایب تعمیم در مبحث روش‌های آماری بدست می‌آید. توضیح روش آماری فاصله ی اطمینان در پیوست (د) آمده است. همچنین در جدول ۳-۱ عدم قطعیت برای ضریب انتقال حرارت در این آزمایش بر اساس این روش آماری آورده شده است.

جدول ۳-۱ عدم قطعیت آزمایش

مؤلفه	عدم قطعیت
شار گرمی ($\text{kg/m}^2 \text{s}$)	$\pm 6/2 \%$
اختلاف دما ($^{\circ}\text{C}$)	$\pm 0/83 \%$
فشار (bar)	$\pm 1 \%$
شار حرارتی (w/m^2)	$\pm 3/4 \%$
ضریب انتقال حرارت ($\text{w/m}^2 \text{K}$)	$\pm 3/9 \%$

۳-۷ نحوه انجام آزمایش

در این دستگاه ابتدا برای انجام آزمایش، دمای آب شور توسط المنت های پیش گرم کن (که در مخزن قرار دارند) افزایش پیدا می کند و توسط پمپ به داخل محفظه اواپراتور پمپاژ می شود. با استفاده از یک رواتر شیشه ای که در مسیر آب و بعد از پمپ آب شور قرار دارد دبی حجمی آب پیش از ورود به محفظه اواپراتور تنظیم می شود. همچنین دمای آب شور نیز قبل از ورود به محفظه توسط سنسور مقاومتی PT100 اندازه گیری می شود و برای نمایش به بخش دیتالاگر ارسال می شود. سپس این آب از ورودی اواپراتور و از طریق نازل ها بر روی لوله های گرم شده با توان الکتریکی و تحت خلأ پاشش شده و بخار می شود.

به دلیل وجود گرادیان فشار، بخار اواپراتور وارد محفظه کندانسور شده و به صورت فالینگ فیلم بر روی لوله ها کندانس می شود. در نهایت آب مقطر از قسمت خروجی کندانسور خارج می شود. همچنین گرمای تقطیر بخار سبب گرم شدن سیال درون کندانسور می شود. آب شور غلیظ شده یا همان پساب نیز از طریق پمپ، از قسمت خروجی اواپراتور به داخل مخزن برگردانده می شود.

برای شروع تست ابتدا دمای آب پیش گرم کن را بر روی عدد موردنظر تنظیم می کنیم و اجازه می - دهیم تا آب به دمای مورد نظر برسد. در این سیستم تغییرات دمای آب پیش گرم (T_f) یکی از

پارامتر هایی خواهد بود که تأثیر آن بر روی ضریب انتقال حرارت جابجایی بررسی خواهد شد و مقادیر مختلف آن ۶۵، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی گراد خواهد بود.

متغیر بعدی دبی آب ورودی به اواپراتور است. با تغییر دبی عدد رینولدز تغییر خواهد کرد و می توان تغییرات این عدد بی بعد را بر روی ضریب انتقال حرارت جابجایی بررسی کرد. مقادیر مختلف دبی برابر با ۴، ۶، ۸ و ۱۰ لیتر بر دقیقه خواهد بود.

آخرین متغیر شار الکتریکی اعمال شده بر لوله های اواپراتور می باشد که قصد داریم با تغییر آن، تأثیر آن را بر تغییر ضریب انتقال حرارت جابجایی بررسی کنیم.

پس از تنظیم دمای آب پیش گرم، با تنظیم ولتاژ مشخص، شار حرارتی موردنظر به لوله های مبدل فالینگ فیلم اعمال می شود و ثابت می ماند. پمپ خلأ نیز شروع به کار می کند تا فشار خلأ موردنظر پایدار شود. دمای اشباع ثابت ۶۵ درجه سانتی گراد را در تمامی تست ها در نظر می گیریم. با رجوع به جداول ترمودینامیکی فشار اشباع مطلق معادل این دما ۰/۲۵ بار می باشد. باتوجه به این نکته که نقطه جوش آب در شهر محل آزمایش (شهر شاهرود) ۹۶ درجه سانتی گراد می باشد، فشار اشباع معادل این دما برابر با ۰/۸۷۸ بار است. از آنجا که گیج فشار، فشار نسبی را اندازه گیری می کند، برای رسیدن به فشار مطلق کاری ۰/۲۵ بار می بایست فشار گیج را بر روی عدد ۰/۶۳- بار تنظیم کنیم. برای راحتی کار، فشار خلأ دستگاه را برابر ۰/۶۵- قرار می دهیم.

با تنظیم دبی، آب در اواپراتور تبخیر و در کندانسور کندانس شود. سپس اعداد دمای نشان داده شده در سنسورهای نصب شده بر لوله خوانده می شود و ضریب انتقال حرارت محلی و پس از آن، ناسلت محلی در آن دبی و شار حرارتی و فشار خلأ محاسبه می شود. درنهایت میانگین این اعداد به عنوان ضریب انتقال حرارت و ناسلت در آن فشار و عدد رینولدز گزارش می شود. سپس دبی را کمی افزایش داده و دوباره این اعداد محاسبه می شود. این روند آنقدر ادامه پیدا می کند تا تمامی دبی های مختلف تست شود. حال می توان نمودار ناسلت برحسب رینولدز را رسم کرد. در آزمایش های بعدی شار حرارتی افزایش داده می شود که نمودارهای جدیدی رسم خواهند شد. سپس دمای آب پیش

گرم عوض می‌شود و آزمایش در دبی‌ها و شارهای حرارتی مختلف انجام می‌شود. هر آزمایش حداقل سه بار تکرار شد و در نهایت یک مجموعه نمودار برای ضریب انتقال حرارت جابجایی برحسب رینولدز در شارهای حرارتی و دماهای پیش‌گرم مختلف رسم شد که مرجع خوبی برای طراحی مبدل فالینگ فیلم در مقیاس کوچک و متوسط خواهد بود.

فصل ۴ : معادلات حاکم و نتایج

۴-۱ معادلات حاکم بخش های مختلف

در این بخش به بیان معادلات حاکم هر قسمت از دستگاه می پردازیم. مشابه قبل جهت سهولت در آدرس دهی، قسمت های مختلف دستگاه را جداگانه نام گذاری می کنیم:

۴-۱-۱ پیش گرم کن

با توجه به ظرفیت ۳۵۰ لیتری مخزن و با در نظر گرفتن ظرفیت حرارتی ویژه آب و بحرانی ترین حالت تست (دمای اولیه آب ۲۰ درجه و دمای پیش گرم ۷۰ درجه سانتی گراد) مدت زمان لازم برای گرم شدن آب توسط المنت های ۶ کیلوواتی را محاسبه می کنیم:

$$Q = m.c\Delta T \rightarrow 350L \times \frac{1kg}{1L} \times 4200 \frac{J}{kg} \times (70 - 20) = 73500kJ \quad (۴-۱)$$

$$\frac{73500kJ}{6kW} = 12250s = 204 \text{ min}$$

یعنی به ۲۰۴ دقیقه یا ۳ ساعت و ۲۴ دقیقه زمان نیاز است تا آب از ۲۰ درجه به ۷۰ درجه سانتی گراد برسد. برای این که دمای تمامی قسمت های مخزن به ۷۰ درجه سانتی گراد برسد و مخزن از لحاظ دمایی یکنواخت شود، پس از روشن کردن المنت ها، پمپ آب مخزن روشن می شود تا آب به صورت مداوم در مخزن چرخش کند و دمای تمامی قسمت های آن یکنواخت شود. لازم است پس از رسیدن دمای آب به دمای ۷۰ درجه، المنت ها خاموش شوند تا دمای آب از حد مجاز فراتر نرود. بالانس جرم و انرژی به صورت معادلات زیر قابل بیان است:

$$\begin{cases} \dot{Q} + \dot{m}h_{in} = \dot{m}h_{out} \\ \sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_{out} \end{cases} \quad (۴-۲)$$

۴-۱-۲ کندانسور

با فرض آدیاباتیک بودن کندانسور، بالانس انرژی برای سیال داخل کندانسور به صورت زیر است:

$$\dot{Q}_C + \dot{m}_{cool} h_{cool} - \dot{m}_{warm} h_{warm} = 0 \quad (۳-۴)$$

که در آن $\dot{m}_{cool}$ دبی جرمی سیال سرد ورودی به کندانسور h_{cool} آنتالپی سیال سرد ورودی به کندانسور $\dot{m}_{warm}$ دبی جرمی سیال گرم خروجی از کندانسور و h_{warm} آنتالپی سیال گرم خروجی از کندانسور است.

با فرض آدیاباتیک بودن کندانسور، بالانس انرژی برای سیال خارج از کندانسور به فرم زیر است:

$$-\dot{Q}_C + \dot{m}_{vapor} h_{vapor} - \dot{m}_{distilled} h_{distilled} = 0 \quad (۴-۴)$$

که در آن $\dot{m}_{vapor}$ دبی جرمی بخار ورودی به محفظه کندانسور، h_{vapor} آنتالپی بخار ورودی به محفظه کندانسور، $\dot{m}_{distilled}$ دبی جرمی آب مقطر خروجی از کندانسور و $h_{distilled}$ آنتالپی آب مقطر خروجی از کندانسور است.

میزان حرارت منتقل شده در کندانسور را با Q_C نمایش می‌دهیم. می‌دانیم این مقدار برابر با تغییرات آنتالپی تبخیر بخار آب خروجی از اواپراتور است. همچنین ضریب کلی انتقال حرارت در کندانسور را با U_C نمایش می‌دهیم رابطه زیر بین این دو پارامتر برقرار است:

$$Q_c = U_c A_c \Delta T_{LMTD} \quad (5-4)$$

در رابطه فوق A_c مساحت سطح انتقال حرارت است که معمولاً برابر با مساحت سطح در تماس با مایع در حال تقطیر است. عبارت ΔT_{LMTD} که عامل انتقال حرارت است را اختلاف دمای لگاریتمی می‌نامند که از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$T_{LMTD} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right)} \quad (6-4)$$

$$\begin{cases} \Delta T_1 = T_{vapor} - T_{cool} \\ \Delta T_2 = T_{distilled} - T_{warm} \end{cases}$$

در رابطه فوق T_{vapor} دمای بخار خروجی از اواپراتور، $T_{distilled}$ دمای آب تقطیر شده، T_{cool} دمای سیال سرد ورودی کندانسور و T_{warm} دمای سیال گرم خروجی از کندانسور می‌باشد. دلیل استفاده از اختلاف دمای لگاریتمی در رابطه فوق آن است که پیوسته دماهای دو سیال داخل و خارج کندانسور در حال تغییر است و ما مجبوریم یک مقدار میانگین برای اختلاف دما در نظر بگیریم.

مهم‌ترین مرحله تعیین مقدار ضریب کلی انتقال حرارت در کندانسور (U_c) است. که طبق رابطه

مشهور (۷-۴) براساس مقاومت های حرارتی تک تک اجزا به دست می‌آید:

$$\frac{1}{U_c} = \frac{1}{h_i} \frac{r_o}{r_i} + \frac{r_o \ln \left(\frac{r_o}{r_i} \right)}{k_w} + \frac{1}{h_o} \quad (8-4)$$

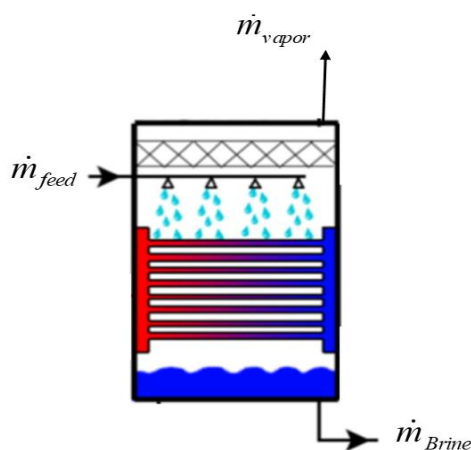
در رابطه فوق U_c ضریب کلی انتقال حرارت کندانسور است. h_i ضریب انتقال حرارت جابجایی برای سیال داخل کندانسور است که برابر با گرمای منتقل شده از بخار تقسیم بر تغییرات دمایی آب داخل کندانسور است. و h_o ضریب انتقال حرارت جابجایی برای سیال خارج کندانسور است. این مقدار برابر با تغییرات آنتالپی تقطیر بخار بر روی لوله های کندانسور است. k_w ضریب انتقال حرارت هدایتی لوله است. r_i و r_o نیز به ترتیب نمایانگر شعاع داخل و خارج لوله است. از در نظر گرفتن رسوب روی لوله ها و ایجاد مقاومت رسوب صرف نظر شده است.

با داشتن مقدار Q_c (تغییرات آنتالپی تقطیر بخار آب خروجی از اواپراتور) و دماهای سیال داخل و خارج کندانسور و همچنین محاسبه ضریب کلی انتقال حرارت کندانسور از رابطه بالا، مساحت کل کندانسور محاسبه می شود.

۳-۱-۴ اواپراتور

با توجه به شکل ۳-۴ و با فرض آدیاباتیک بودن محفظه اواپراتور، معادله بقای انرژی برای اواپراتور به صورت زیر نوشته می شود:

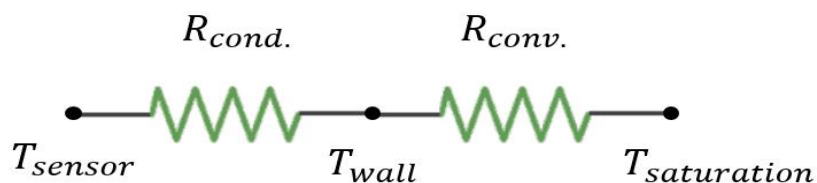
$$\dot{Q}_E + \dot{m}_{feed} h_{feed} - \dot{m}_{Brine} h_{Brine} - \dot{m}_{vapor} h_{vapor} = 0 \quad (۹-۴)$$



شکل ۱-۴ شماتیک اواپراتور

برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی در بیرون لوله می‌بایست دمای خارجی سطح لوله را داشته باشیم تا از طریق رابطه ۴-۹ و با داشتن شار و دمای اشباع محفظه، ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی محاسبه شود. اما از آنجا که با گذاشتن سنسور روی دیواره خارجی لوله، جریان فالینگ فیلم خارجی به هم می‌خورد لذا ما سنسور ها را در داخل لوله و چسبیده به دیواره داخلی لوله قرار می‌دهیم و با محاسبه مقاومت هدایتی لوله، دمای خارجی سطح لوله (T_w) را بدست می‌آوریم.

$$q'' = h \zeta \quad (10-4)$$



شکل ۴-۲ شماتیک مقاومت های حرارتی

$$\frac{T_{sensor} - T_{wall}}{R_{cond.}} = \frac{T_{wall} - T_{saturation}}{R_{conv.}} = \frac{T_{sensor} - T_{saturation}}{R_{cond.} + R_{conv.}} \quad (11-4)$$

$$R_{cond.} = \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2k \pi L} \quad (12-4)$$

$$R_{conv.} = \frac{1}{h_o A}$$

$$Q = U A \Delta T \quad (13-4)$$

$$\rightarrow q'' = U \Delta T = \frac{\Delta T}{R} = \frac{T_{sensor} - T_{wall}}{R_{cond.}}$$

طبق رابطه فوق با داشتن q'' (شار حرارتی اعمال شده به لوله ها) و محاسبه مقاومت حرارتی لوله و خواندن دمای سنسور در هر نقطه، می‌توان دمای سطح خارجی همان نقطه را بدست آورد. نکته مهم آن که برای خواندن ضریب انتقال حرارت هدایتی لوله از جدول، از دمای میانگین سطح لوله

یعنی میانگین دمای سطح و دمای اشباع استفاده می‌شود.

۴-۲ تشکیل رسوب در اواپراتور

تشکیل رسوب^۱ به انباشته شدن مواد نامطلوب روی یک سطح گفته می‌شود. در مدت زمان طولانی و با تغییر فاز آب هنگام گرما گرفتن از لوله های داغ اواپراتور و بخار شدن، املاح و ناخالصی های آن به صورت لایه ای از رسوب بر روی لوله های اواپراتور تشکیل خواهد شد. تشکیل رسوب منجر به افزایش مقاومت حرارتی و همچنین افزایش افت فشار می‌گردد. در نتیجه، این دو عامل باعث کاهش نرخ انتقال گرما و همچنین کاهش کارایی اواپراتور خواهند شد.

با اضافه کردن عامل رسوب به عنوان عامل مزاحم به معادله ۴-۷ شکل نهایی معادله به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{1}{U_e} = \frac{1}{h_i} \frac{r_o}{r_i} + \frac{r_o \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{k_w} + R_f + \frac{1}{h_o} \quad (۴-۱۳)$$

که در آن، عبارت R_f بیانگر مقاومت رسوب می‌باشد.

برای بررسی امکان ایجاد رسوب بر روی لوله های اواپراتور، بررسی دو عامل زمان و ویژگی های آب ورودی الزامی می‌باشد. با انجام تست آنالیز آب می‌توان میزان TDS آب ورودی به ستاپ را اندازه گیری کرد و از مقدار املاح موجود در آن و امکان ایجاد کریستال های نمک پس از تغییر فاز آب بر روی لوله های اواپراتور با خبر شد. (نتایج تست آنالیز آب در پیوست ب) قرار داده شده است.

پس از انجام تست، مشخص گردید میزان TDS آب ورودی به دستگاه برابر با ۴۵۴ ppm و میزان سختی آب برابر با ۱۰۰ ppm می‌باشد. همچنین مدت زمان کار با دستگاه برای انجام آزمایش های پایان نامه ۱۴ روز بوده است. با بررسی عوامل گفته شده و همچنین مشاهدات تجربی که در

¹ Fouling

آزمایشگاه صورت گرفته شد، به دلیل ناچیز بودن میزان رسوب شکل گرفته بر روی لوله ها، از اثر مقاوت حرارتی رسوب در محاسبات ضریب انتقال حرارت صرف نظر شده است.

لازم به ذکر است که در صنعت برای جلوگیری از کاهش راندمان دستگاه‌ها و همچنین جلوگیری از هزینه های ناشی از ایجاد رسوب، در فواصل منظم عملیات سرویس و تمیزکاری تجهیزات انجام می‌گیرد. در این آزمایش نیز پس از گذشت زمان دو هفته، لوله‌های اواپراتور و کندانسور مورد تمیزکاری قرار گرفت.

۳-۴ پدیده جوشش در اواپراتور

جوشش عبارت است از تبخیر در فصل مشترک جامد- مایع، هنگامی که دمای دیواره از دمای اشباع سیال متناظر با فشار آن، بیشتر شده و حرارت از سطح دیواره‌ی جامد به سیال منتقل شود. [۵۱]

پدیده‌های جوشش به دو دسته کلی تقسیم بندی می‌شوند:

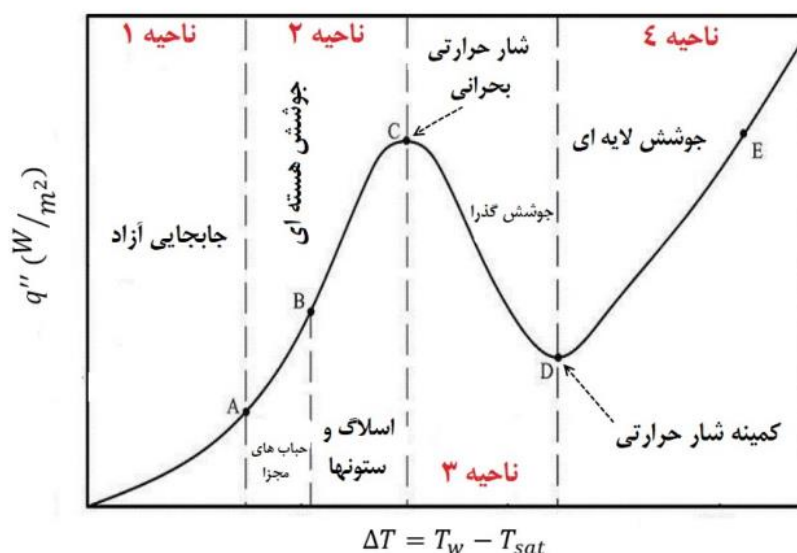
جوشش استخری^۱: در این حالت از جوشش، سیال ساکن است و حرکت سیال در نزدیکی سطح دیواره بر اثر جابجایی آزاد و اغتشاش ناشی از جدایش حباب از سطح می‌باشد.

جوشش با جابجایی اجباری^۲: در این حالت از جوشش، جریان سیال ناشی از حرکت کپه‌ای سیال بر اثر عامل خارجی و نیز ناشی از نیروی شناوری است.

¹ Pool Boiling

² Forced Convective Boiling

برای پیش‌بینی رخ دادن پدیده جوشش انواع متعددی از مدل های شار حرارتی دیواره در دسترس است. این مدل ها عموماً از روابط تجربی برای پیش‌بینی رفتار جریان سیال استفاده می‌کنند. این روابط تجربی نرخ انتقال حرارت دیواره یا ضریب انتقال حرارت را به دمای فوق گرم دیواره از طریق



شکل ۳-۴ منحنی رژیم های مختلف جوشش [۵۲]

گروه های بی بعد به هم مرتبط می‌سازند. منحنی جوشش براساس این روابط تجربی ترسیم می‌شود که نشان دهنده‌ی رابطه‌ی بین شار حرارتی و دمای بین سطح و سیال است. [۵۲]

در حالت کلی عوامل مختلفی همانند گرمای نهان تبخیر (h_{fg})، فشار اشباع، دینامیک حباب، خواص سطح، دمای دیواره، نیروهای شناوری سیال و خواص سیال (ویسکوزیته، کشش سطحی، چگالی و...) در بروز پدیده‌ی جوشش تأثیر گذار هستند. با تغییر و یا کنترل هر یک از این عوامل، می‌توان پدیده جوشش را کنترل نمود.

در محفظه اواپراتور نیز می‌توان با کنترل دمای آب ورودی، فشار اشباع (که توسط پمپ وکیوم قابل تنظیم است) و همچنین دمای دیواره (که توسط میزان شار اعمال شده قابل تنظیم است) می‌توان بروز پدیده جوشش را کنترل کرد. کنترل کردن پدیده جوشش و تلاش برای جلوگیری از وقوع آن در

محفظه اواپراتور از این جهت حائز اهمیت است که با ایجاد اولین حباب ها در جریان آب، پدیده کاویتاسیون^۱ در پمپ آب پسماند اتفاق خواهد افتاد که سبب اختلال در فرایند مکش و در نهایت باعث آسیب دیدن پروانه پمپ خواهد شد.

دانستن خواص آب ورودی به اواپراتور در تنظیم عوامل ذکر شده بسیار مؤثر است. از این رو پس از انجام آزمایش گرانروی^۲ توسط دستگاه رئومتر^۳ خواص آب ورودی به سیستم شامل ویسکوزیته و کشش سطحی در پیوست ج) قرار داده شده است.

¹ Cavitation

² Viscosity

³ Rheometer

فصل ۵: نتیجه گیری

۵-۱ اعداد بدون بعد

اعداد بی بعد مهم در این آزمایش رینولدز، ناسلت و پراتل هستند. جدول ۵-۱ اعداد بدون بعد و مرجع آن ها را نشان می دهد.

جدول ۵-۱ اعداد بی بعد مهم در پژوهش

مرجع	بازه احتمالی	فرمول	تعریف	عدد بی بعد
[۵۳]	کمتر از ۷۰۰	$\frac{4\Gamma}{\mu}$	رینولدز فالینگ فیلم	Re
[۵۳]	۷۵ تا ۲۷۵	$\frac{h_o d}{k}$	ناسلت فالینگ فیلم	Nu
[۵۳]	۲/۵۵ تا ۳/۹۱	$\frac{\mu C_p}{k}$	پراتل	Pr

۵-۲ ثبت داده ها و تجزیه و تحلیل آنها

در انجام تست ها هدف یافتن تأثیر پارامتر های دمای آب پیش گرم، شار حرارتی و دبی آب ورودی بر ضریب انتقال حرارت فالینگ فیلم است. لذا نحوه انجام آزمایش به این صورت است که ابتدا دمای آب پیش گرم برابر با ۶۰ درجه سانتی گراد تنظیم می شود. با توجه به فشار اشباع ۰/۳۱ بار مطلق در شهر شاهرود، دمای آب اشباع برابر با ۶۵ درجه سانتی گراد است. شار ورودی به مجموعه بر روی عدد 18 kw/m^2 تنظیم می شود. مبنای تنظیم میزان شار براساس جلوگیری از جوشش استخری^۱ و هسته ای^۲ با توجه به فشار خلاء محفظه (۰/۳۱ بار مطلق) می باشد. دبی پاششی به ترتیب برابر با ۴ و ۶ و ۸ و ۱۰ لیتر بر دقیقه تنظیم می شود. سپس در هر مرحله زمان کافی برای پایدار شدن (steady)

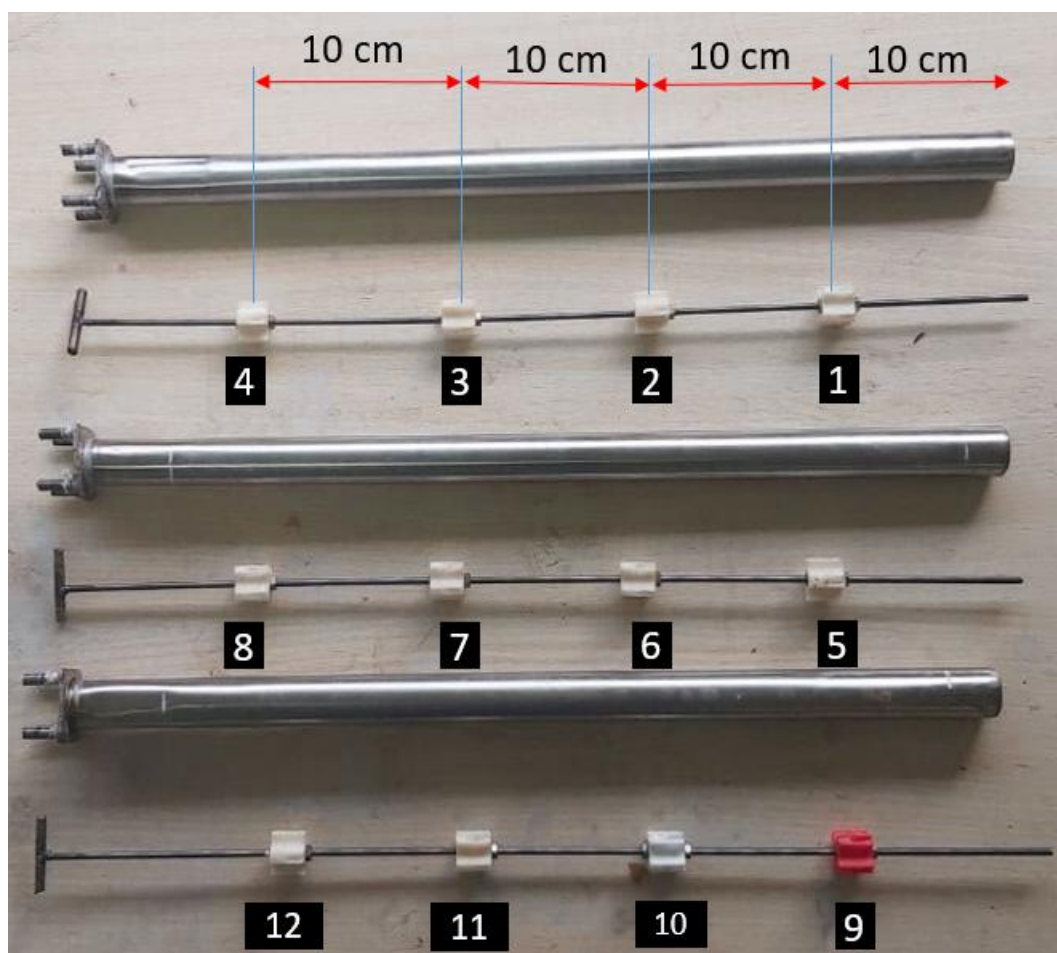
^۱ Pool boiling

^۲ Nuclear boiling

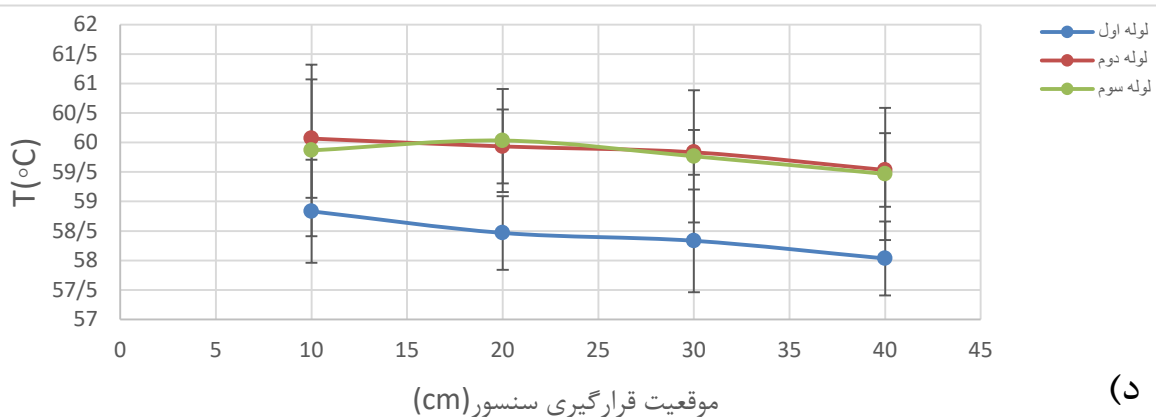
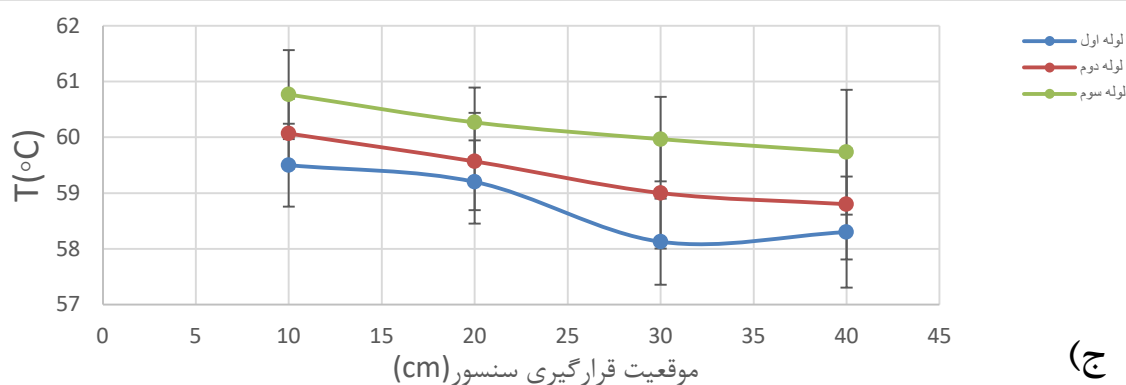
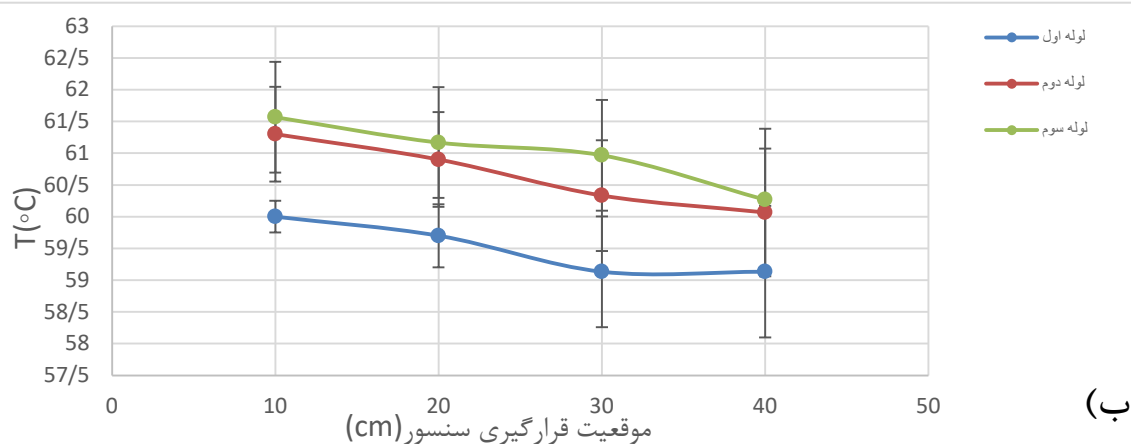
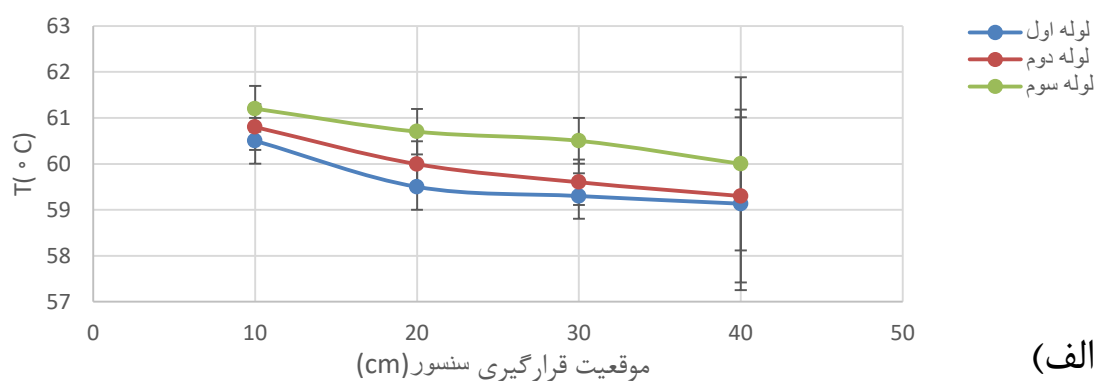
(time) به سیستم داده می‌شود و بعد داده ها از طریق دستگاه دیتالاگر ثبت می‌شود. سپس شار ورودی به مجموعه را تغییر داده و برابر با $25 \text{ kw}/m^2$ (کم تر از میزان لازم برای شروع جوشش) در نظر گرفته می‌شود و مجدداً دبی های ۴ و ۶ و ۸ و ۱۰ لیتر بر دقیقه تست می‌شود. در پایان برای به حداقل رساندن میزان خطا، هر تست حداقل سه بار تکرار می‌شود تا خطاهای اندازه گیری دما سطح لوله مشخص شود. سپس نتایج با استفاده از روش آزمون فاصله اطمینان^۱ در جداول ثبت می‌شوند. در مرحله بعد تمامی مراحل بالا برای دمای آب پیش گرم ۶۵ درجه و سپس برای دمای آب پیش گرم ۷۰ درجه سانتی گراد آزمایش می‌شود. تمامی نتایج تست ها شامل دمای تمامی سنسور ها و ضریب انتقال حرارت محلی در پیوست الف) آورده شده است.

در طی فرآیند آزمایش بسیار مهم است که در هر لحظه دمای نقاط خاصی از لوله (که قبلاً طول آنها از یک سر لوله اندازه گیری شده است) نمایش داده شود تا به کمک آن، روند چگونگی تغییر دمای آن نقطه تحت شرایط متفاوت تفسیر شود. برای این منظور مطابق شکل ۵-۱ با تقسیم طول لوله به قسمت های مساوی، سنسور های دمایی را داخل لوله طوری قرار می‌دهیم که سر پراب سنسور در تماس کامل با دیواره داخلی لوله باشد. به کمک این روش می‌توان نمودار های دما بر حسب موقعیت سنسور را در شرایط متفاوت تست رسم کرد.

¹ Confidence Interval test



شکل ۱-۵ تعداد سنسور ها داخل لوله های اول، دوم و سوم اواپراتور و موقعیت دقیق آنها



نمودار ۵-۱ دماهای سطح لوله ها در حالت شار ۱۸ کیلووات بر متر مربع و دمای آب پیش گرم ۶۰ درجه به ترتیب از بالا به پایین برای دبی های الف) ۴ ب) ۶ ج) ۸ و د) ۱۰ لیتر بر دقیقه و با درصد خطای ± 1 درجه سانتی گراد

۵-۲-۱ تاثیر دبی آب ورودی بر نتایج تست

مطابق داده های جدول ۶-۱ تا ۶-۴ (پیوست الف) دمای های نقاط مختلف سطح لوله در حالت شار ۱۸ کیلووات بر متر مربع و دبی ۴ و ۶ و ۸ و ۱۰ لیتر بر دقیقه و دمای پیش گرم ۶۰ درجه در نمودار ۵-۱ قرار گرفته است. با دانستن میزان شار و دمای اشباع محفظه، ضریب انتقال حرارت فالینگ فیلم در این نقاط را محاسبه کرده و در جداول مربوط به هر حالت تست که در پیوست الف) آمده است قرار داده می شود. محل قرارگیری سنسور ها به فاصله هر ۱۰ سانتی متر از هم و داخل لوله ها می باشد.

در هر حالت تست، با سه بار تکرار و از طریق روش آزمون فاصله اطمینان نسبت به محاسبه خطاها اقدام می شود. از تحلیل نمودار های بالا نتایج زیر حاصل می شود:

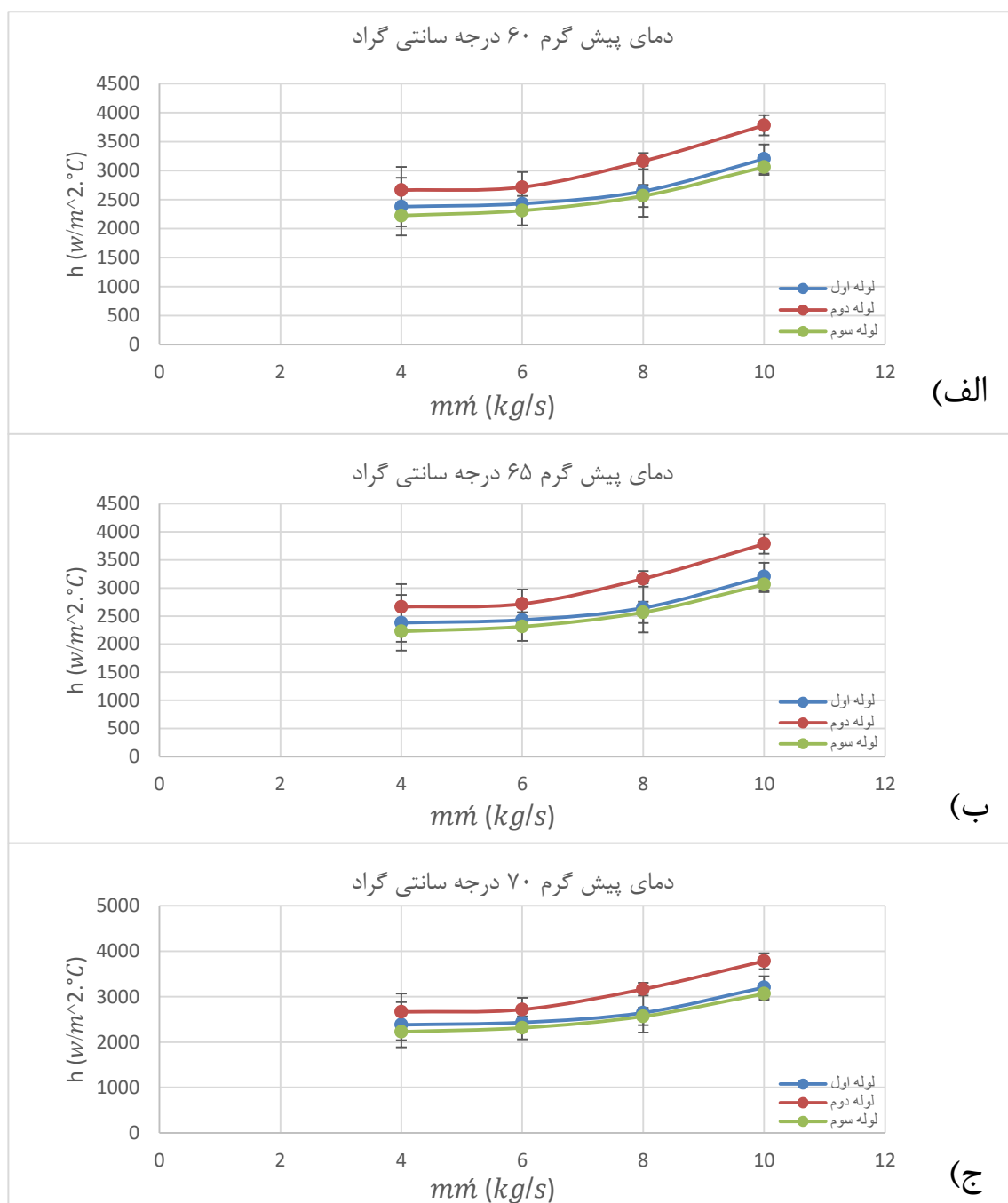
۱- مشاهده می شود که با افزایش دبی و آشفته شدن جریان، واگرایی دمایی در هنگام تکرار تست ها بیشتر شده و درصد خطای محاسبه شده افزایش می یابد. توجیه فیزیکی آن ایجاد آشفتگی در جریان فالینگ فیلم روی لوله ها و پیدایش اختلاف دمایی شدید در جریان های آشفته فالینگ فیلم می باشد.

۲- مشاهده می شود که همواره دمای نقاط انتهایی لوله (موقعیت ۴۰ سانتی متری) نسبت به دمای نقاط ابتدایی لوله (۱۰ سانتی متری) سرد تر است. زیرا به علت نزدیک تر بودن موقعیت این سنسور با دمای محیط آزمایشگاه، همواره دمای کمتری را نشان می دهد. ولی با افزایش دبی جریان و رسیدن به حالت تعادل دمایی، مشاهده می شود که تغییرات دما در طول لوله کاهش می یابد. همچنین با افزایش دبی آب ورودی، تغییرات دمایی در طول هر لوله (از موقعیت ۱۰ سانتی متر تا موقعیت ۴۰ سانتی متر) کاهش یافته و همچنین دمای سطح لوله ها نیز کاهش می یابد. این امر سبب می شود تا در شرایط شار حرارتی ثابت و دمای اشباع ثابت، ضریب انتقال

جابجایی فالینگ فیلم افزایش یابد. توجه فیزیکی این امر آن است که سرعت حرکت جریان فالینگ فیلم بر روی لوله آنقدر زیاد می‌شود که سیال وقت کافی برای تبادل حرارت با لوله را پیدا نمی‌کند. (با افزایش ضخامت جریان فالینگ فیلم، ضریب انتقال حرارت جابجایی کاهش می‌یابد)

۵-۲-۲ تأثیر دمای آب پیش گرم بر نتایج تست

پس از انجام آزمایش با شار حرارتی و دمای پیش گرم ثابت، نوبت به آن می‌رسد که دمای آب پیش گرم تغییر داده شود و تست ها با دمای پیش گرم ۶۵ درجه و ۷۰ درجه سانتی گراد انجام شود. نمودار های ۵-۲ به مقایسه تأثیر دمای آب پیش گرم بر ضریب انتقال حرارت فالینگ فیلم می‌پردازد.



نمودار ۵-۲ تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی در سه لوله تحت شار ۱۸ کیلووات بر متر مربع و دمای پیش گرم (الف) ۶۰ درجه (ب) ۶۵ درجه و (ج) ۷۰ درجه سانتی گراد

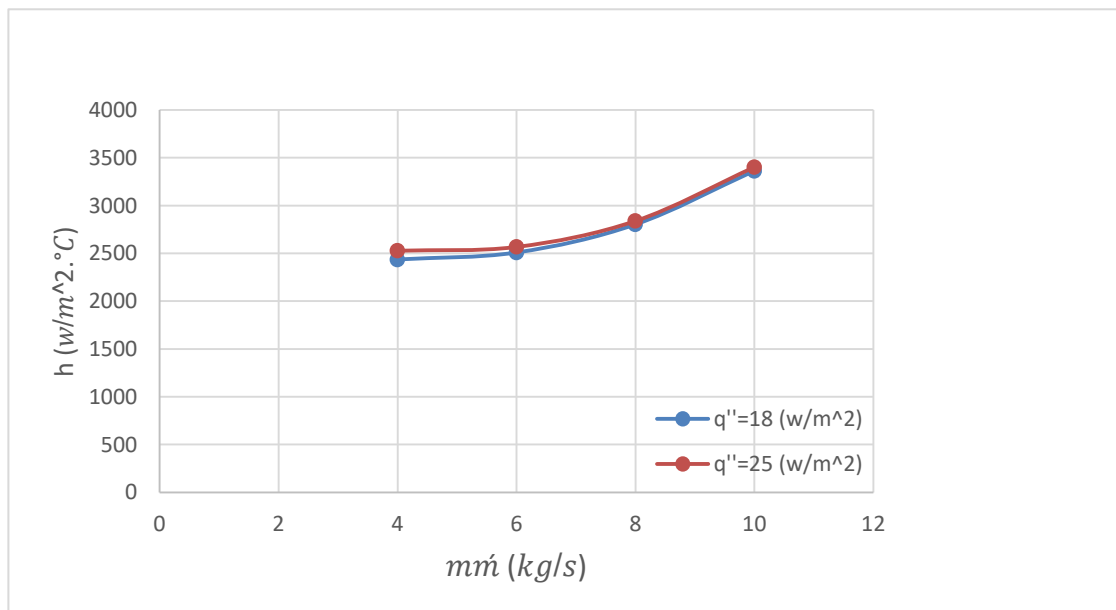
با توجه به نمودار ۵-۲ می‌توان دریافت که تغییر دمای آب پیش گرم تأثیری بر ضریب انتقال حرارت جابجایی ندارد. در حقیقت این پارامتر فقط بر روی درصد تبخیر تأثیرگذار است. تفسیر فیزیکی آن به این صورت است که هرچه دمای آب پیش گرم بیشتر باشد، در برخورد با لوله های داغ اواپراتور و در فشار خلاء، نیاز به انرژی کمتری برای تبخیر شدن دارد. لذا با کمترین انرژی، نرخ بخار تولیدی و به تبع آن نرخ آب شیرین خروجی بیشتر می‌شود.

با توجه به آن که در جریان فالینگ فیلم با عبور از عدد رینولدز ۴۰۰ وارد جریان آشفته می‌شویم [۵۳] در این حالت با افزایش دبی آب ورودی، ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش می‌یابد که این رفتار در هر سه قسمت نمودارهای ۵-۲ قابل مشاهده است.

در مورد ضریب انتقال حرارت جابجایی لوله اول نمی‌توان به طور قاطع صحبت کرد چرا که به خاطر حالت پاشش آشفته و ضربه ای جریان آب روی آن و همچنین غیر یکنواخت بودن ضخامت فالینگ فیلم، ضریب انتقال حرارت جابجایی آن پیوسته در حال تغییر است. ولی برای لوله دوم و سوم از آنجا که دبی آب روی لوله دوم همواره از لوله سوم بیشتر است. (همواره بخشی از آب به هنگام عبور از لوله ها تبخیر می‌شود لذا دبی عبوری از لوله های بالاتر بیشتر است) و با توجه به این که در جریان آشفته با افزایش دبی، ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش می‌یابد، می‌توان گفت ضریب انتقال حرارت جابجایی در لوله دوم همواره از لوله سوم بیشتر است. (با توجه به نمودار های ۵-۲ ضریب انتقال حرارت جابجایی در لوله دوم در حدود ۱۰ درصد بیشتر از لوله سوم است)

۳-۵ تأثیر تغییرات شار بر ضریب انتقال حرارت جابجایی

برای بررسی تأثیر تغییر شار حرارتی بر ضریب انتقال حرارت فالینگ فیلم در شرایط غیر جوششی می‌بایست تمامی آزمایش‌ها را با مقادیر متفاوت شار حرارتی تکرار کرد، سپس نمودار تغییرات ضریب



نمودار ۳-۵ تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی فالینگ فیلم در دبی‌های مختلف تحت اعمال شار ۱۸ و ۲۵ کیلووات بر متر مربع در دمای پیش گرم ۶۰ درجه سانتی‌گراد

انتقال حرارت جابجایی را در دبی‌های مختلف و شارهای حرارتی مختلف رسم کرد.

برای مقایسه تأثیر تغییرات شار حرارتی بر ضریب انتقال حرارت فالینگ فیلم مطابق نمودار ۳-۵ داریم:

همانگونه که در نمودار فوق قابل مشاهده است، در حالت انتقال حرارت غیر جوشش، با افزایش شار حرارتی، ضریب انتقال حرارت جابجایی تغییر محسوسی نمی‌کند. همچنین با توجه به فرمول ۱-۵ که توسط آقای هان و فلچر به صورت تجربی بیان شده است مشاهده می‌شود که در حالت انتقال حرارت غیر جوششی، محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی مستقل از شار حرارتی است.

برای تفسیر این پدیده می‌توان گفت که از آنجا که شار حرارتی حاصل ضرب ضریب انتقال حرارت جابجایی در تغییرات دمای سطح و دمای اشباع است، $(q'' = h(T_w - T_{sat.}))$ با افزایش شار، دمای

سطح نیز افزایش پیدا می‌کند ولی نسبت شار به تغییرات دمایی تقریباً ثابت می‌ماند لذا ضریب انتقال حرارت جابجایی نیز تقریباً ثابت می‌ماند. (در حالت غیر جوشش)

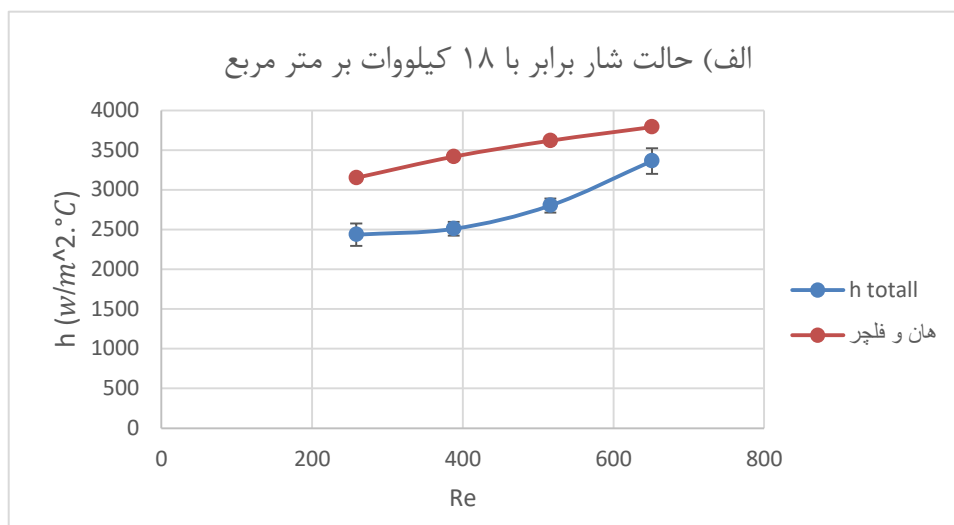
۵-۴ اعتبار سنجی تست ها

برای اعتبار سنجی مقادیر به دست آمده باید آنها را با رابطه تجربی مقایسه کرد. آقای هان و فلچر رابطه ای را برای محاسبه ضریب انتقال حرارت غیرجوشش برای فیلم نازک آب جاری بر روی لوله افقی ارائه کردند.

$$h_o \left(\frac{v^2}{gk^3} \right)^{\frac{1}{3}} = 0.025 \text{Re}^{0.2} \text{Pr}^{0.53} \quad (۵-۱)$$

برای استفاده از فرمول ۵-۱ می‌توان با قرار دادن عدد رینولدز و پرانتر جریان موردنظر در رابطه بالا، ضریب انتقال حرارت جابجایی را به صورت تجربی به دست آورد و یا با رسم نمودار ضریب انتقال حرارت جابجایی فالینگ فیلم بر حسب تغییرات عدد رینولدز، می‌توان نمودار رابطه تجربی فوق را با مقادیر به دست آمده از آزمایش های این پژوهش مقایسه کرد.

برای اعتبار سنجی مقادیر به دست آمده در حالت دمای آب پیش گرم برابر با ۶۰ درجه سانتی گراد، یک بار با شار حرارتی ۱۸ کیلووات بر متر مربع و بار دیگر با شار حرارتی ۲۵ کیلووات بر متر مربع در اعداد رینولدز حاصل از دبی های ۴ ، ۶ ، ۸ و ۱۰ لیتر بر دقیقه ضرایب انتقال حرارت جابجایی فالینگ فیلم را بر حسب تغییرات عدد رینولدز رسم می‌کنیم. سپس با جایگذاری همین اعداد رینولدز در رابطه تجربی هان و فلچر، ضرایب انتقال حرارت جابجایی فالینگ فیلم را بر حسب تغییرات عدد رینولدز برای این رابطه تجربی رسم می‌کنیم. در نهایت با مقایسه این دو نمودار، میزان انحراف داده ها مشخص می‌شود.



نمودار ۴-۵ مقایسه نتایج آزمایش در دبی های مختلف و دمای آب پیش گرم ۶۰ درجه با

رابطه تجربی هان و فلچر الف) شار حرارتی ۱۸ کیلووات بر متر مربع ب) شار حرارتی ۲۵

کیلووات بر متر مربع

با توجه به نتایج نمودار ۴-۵ مشهود است که در نمودار رابطه تجربی هان و فلچر نیز با افزایش دبی و

عدد رینولدز (در جریان های آشفته) ضریب انتقال حرارت جابجایی فالینگ فیلم نیز افزایش می یابد.

به طور میانگین درصد انحراف نتایج آزمایش در مقایسه با رابطه تجربی در حالت الف) برابر با ۲۰/۷۸

درصد و در حالت ب) برابر با ۱۹/۱۳ درصد می باشد. یعنی به طور میانگین درصد انحراف نتایج در

مقایسه با رابطه تجربی با افزایش شار (از ۱۸ کیلووات بر مترمربع به ۲۵ کیلووات بر مترمربع) کاهش

می یابد.

فصل ۴ پیوست‌ها

پیوست الف) نتایج تست‌ها در حالت‌های مختلف

جدول ۱-۶ حالت شار ۱۸ کیلووات بر متر مربع و دبی ۴ لیتر بر دقیقه

ورودی ها	معادلات	نتایج
$T_{s1} = 73.6361$	$\Gamma = \dot{m}/2L$	$0.0278 \frac{kg}{m.s}$
$T_{s2} = 73.4291$	$Re = 4\Gamma/\mu =$	258.6
$T_{s3} = 72.5046$	$\dot{q} = Q/A =$	$18333.333 \frac{W}{m^2}$
$T_{s4} = 78.0457$	$Pr = \nu/\alpha =$	2.76463
$T_{s5} = 72.6697$	$h_1 = \frac{\dot{q}}{T_{s1} - T_{sat.}} =$	2124.990862
$T_{s6} = 72.5203$	$h_2 = \frac{\dot{q}}{T_{s2} - T_{sat.}} =$	2176.028438
$T_{s7} = 72.2039$	$h_3 = \frac{\dot{q}}{T_{s3} - T_{sat.}} =$	2446.888252
$T_{s8} = 70.4184$	$h_4 = \frac{\dot{q}}{T_{s4} - T_{sat.}} =$	2779.577211
$T_{s9} = 73.2775$	$h_5 = \frac{\dot{q}}{T_{s5} - T_{sat.}} =$	2393.437117
$T_{s10} = 73.0071$	$h_6 = \frac{\dot{q}}{T_{s6} - T_{sat.}} =$	2441.567271
$T_{s11} = 72.5183$	$h_7 = \frac{\dot{q}}{T_{s7} - T_{sat.}} =$	2549.594807
$T_{s12} = 74.3516$	$h_8 = \frac{\dot{q}}{T_{s8} - T_{sat.}} =$	3392.705063
$\dot{m} = 0.066 \frac{kg}{s}$	$h_9 = \frac{\dot{q}}{T_{s9} - T_{sat.}} =$	2217.919327
$T_{feed} = 60^\circ$	$h_{10} = \frac{\dot{q}}{T_{s10} - T_{sat.}} =$	2293.813508
$T_{sat.} = 65^\circ$	$h_{11} = \frac{\dot{q}}{T_{s11} - T_{sat.}} =$	2445.522603
$Q = 1760 \text{ W}$	$h_{12} = \frac{\dot{q}}{T_{s12} - T_{sat.}} =$	1965.490155
$L = 1.2 \text{ m}$	$h_{tube1} =$	2381.871191
$R_{cond.} = 0.0001316 \ \Omega$	$h_{tube2} =$	2694.326065
$r_i = 25 \text{ mm}$	$h_{tube3} =$	2230.686398
$r_o = 25.4 \text{ mm}$	$h_{total} =$	2435.627885
$k_{pipe} = 16 \frac{W}{m.k}$	$h_{correlation} =$	$3151.45 \frac{W}{m^2.c}$
$k_{film} = 0.655349 \frac{W}{m.k}$	Error% =	22.71%
$\mu = 0.000432893$	$Nu = \frac{h_o d}{k_{film}}$	188.81
$\nu = 4.415E-7$	$d = 50.8mm$	
$C_p = 4185.43 \frac{J}{kg.k}$		

جدول ۶-۲ حالت شار ۱۸ کیلووات بر متر مربع و دبی ۶ لیتر بر دقیقه

ورودی ها	معادلات	نتایج
$T_{s1} =$	73.6013	$\Gamma = \dot{m}/L = 0.0417 \frac{kg}{m.s}$
$T_{s2} =$	73.1004	$Re = 4\Gamma/\mu = 387.9$
$T_{s3} =$	72.7372	$\dot{q} = Q/A = 18333.333 \frac{W}{m^2}$
$T_{s4} =$	71.1446	$Pr = \nu/\alpha = 2.76463$
$T_{s5} =$	72.5030	$h_1 = \frac{\dot{q}}{T_{s1} - T_{sat.}} = 2132.0874$
$T_{s6} =$	72.5922	$h_2 = \frac{\dot{q}}{T_{s2} - T_{sat.}} = 2263.5363$
$T_{s7} =$	72.3602	$h_3 = \frac{\dot{q}}{T_{s3} - T_{sat.}} = 2369.9387$
$T_{s8} =$	70.0219	$h_4 = \frac{\dot{q}}{T_{s4} - T_{sat.}} = 2985.0286$
$T_{s9} =$	72.8245	$h_5 = \frac{\dot{q}}{T_{s5} - T_{sat.}} = 2443.5348$
$T_{s10} =$	72.7361	$h_6 = \frac{\dot{q}}{T_{s6} - T_{sat.}} = 2414.9109$
$T_{s11} =$	72.4234	$h_7 = \frac{\dot{q}}{T_{s7} - T_{sat.}} = 2491.0439$
$T_{s12} =$	73.4775	$h_8 = \frac{\dot{q}}{T_{s8} - T_{sat.}} = 3654.1404$
$\dot{m} = 0.1 \frac{kg}{s}$		$h_9 = \frac{\dot{q}}{T_{s9} - T_{sat.}} = 2343.5288$
$T_{feed} = 60^\circ$		$h_{10} = \frac{\dot{q}}{T_{s10} - T_{sat.}} = 2370.2812$
$T_{sat.} = 65^\circ$		$h_{11} = \frac{\dot{q}}{T_{s11} - T_{sat.}} = 2470.1961$
$Q = 1760 \text{ W}$		$h_{12} = \frac{\dot{q}}{T_{s12} - T_{sat.}} = 2167.0353$
$L = 1.2 \text{ m}$		$h_{tube1} = 2437.6477$
$R_{cond.} = 0.0001316 \Omega$		$h_{tube2} = 2750.9075$
$r_i = 25 \text{ mm}$		$h_{tube3} = 2337.7604$
$r_o = 25.4 \text{ mm}$		$h_{total} = 2508.7719$
$k_{pipe} = 16 \frac{W}{m.k}$		$h_{correlation} = 3417.66 \frac{W}{m^2.c}$
$k_{film} = 0.655349 \frac{W}{m.k}$		Error%= 26.6%
$\mu = 0.000432893$		$Nu = \frac{h_o d}{k_{film}} = 192.953$
$\nu = 4.415E-7$		$d = 50.8mm$
$C_p = 4185.43 \frac{J}{kg.k}$		

جدول ۳-۶ حالت شار ۱۸ کیلووات بر متر مربع و دبی ۸ لیتر بر دقیقه

ورودی ها	معادلات	نتایج
$T_{s1} =$	73.1318	$\Gamma = \dot{m}/L$ 0.0555 $\frac{kg}{m.s}$
$T_{s2} =$	72.9917	$Re = 4\Gamma/\mu =$ 516.28
$T_{s3} =$	73.6165	$\dot{q} = Q/A =$ 18333.333 $\frac{W}{m^2}$
$T_{s4} =$	70.5257	$Pr = \nu/\alpha =$ 2.76463
$T_{s5} =$	71.5651	$h_1 = \frac{\dot{q}}{T_{s1} - T_{sat.}} =$ 2377.4895
$T_{s6} =$	72.2787	$h_2 = \frac{\dot{q}}{T_{s2} - T_{sat.}} =$ 2423.0784
$T_{s7} =$	72.0687	$h_3 = \frac{\dot{q}}{T_{s3} - T_{sat.}} =$ 2191.1622
$T_{s8} =$	69.4815	$h_4 = \frac{\dot{q}}{T_{s4} - T_{sat.}} =$ 3675.3483
$T_{s9} =$	73.02295	$h_5 = \frac{\dot{q}}{T_{s5} - T_{sat.}} =$ 3155.3452
$T_{s10} =$	74.8525	$h_6 = \frac{\dot{q}}{T_{s6} - T_{sat.}} =$ 2585.9628
$T_{s11} =$	73.2074	$h_7 = \frac{\dot{q}}{T_{s7} - T_{sat.}} =$ 2658.6095
$T_{s12} =$	70.4900	$h_8 = \frac{\dot{q}}{T_{s8} - T_{sat.}} =$ 4377.1188
$\dot{m} = 0.133 \frac{kg}{s}$		$h_9 = \frac{\dot{q}}{T_{s9} - T_{sat.}} =$ 2385.2258
$T_{feed} = 60^\circ$		$h_{10} = \frac{\dot{q}}{T_{s10} - T_{sat.}} =$ 1923.7719
$T_{sat.} = 65^\circ$		$h_{11} = \frac{\dot{q}}{T_{s11} - T_{sat.}} =$ 2294.6954
$Q = 1760 \text{ W}$		$h_{12} = \frac{\dot{q}}{T_{s12} - T_{sat.}} =$ 3582.2551
$L = 1.2 \text{ m}$		$h_{tube1} =$ 2666.7696
$R_{cond.} = 0.0001316 \Omega$		$h_{tube2} =$ 3194.2591
$r_i = 25 \text{ mm}$		$h_{tube3} =$ 2546.4871
$r_o = 25.4 \text{ mm}$		$h_{total} =$ 2802.5052
$k_{pipe} = 16 \frac{W}{m.k}$		$h_{correlation} =$ 3618.78 $\frac{W}{m^2.c}$
$k_{film} = 0.655349 \frac{W}{m.k}$		Error%= 22.55%
$\mu = 0.000432893$		$Nu = \frac{h_o d}{k_{film}}$ 217.25
$\nu = 4.415E-7$		$d = 50.8mm$
$C_p = 4185.43 \frac{J}{kg.k}$		

جدول ۴-۶ حالت شار ۱۸ کیلوولت بر متر مربع و دبی ۱۰ لیتر بر دقیقه

ورودی ها	معادلات	نتایج
$T_{s1} =$	71.6023	$\Gamma = \dot{m}/L = 0.07 \frac{kg}{m.s}$
$T_{s2} =$	71.4182	$Re = 4\Gamma/\mu = 651.16$
$T_{s3} =$	70.8289	$\dot{q} = Q/A = 18333.333 \frac{W}{m^2}$
$T_{s4} =$	69.5382	$Pr = \nu/\alpha = 2.76463$
$T_{s5} =$	70.4815	$h_1 = \frac{\dot{q}}{T_{s1} - T_{sat.}} = 2778.3870$
$T_{s6} =$	70.7408	$h_2 = \frac{\dot{q}}{T_{s2} - T_{sat.}} = 2857.7885$
$T_{s7} =$	70.5390	$h_3 = \frac{\dot{q}}{T_{s3} - T_{sat.}} = 3147.8929$
$T_{s8} =$	68.4590	$h_4 = \frac{\dot{q}}{T_{s4} - T_{sat.}} = 4044.1300$
$T_{s9} =$	71.3214	$h_5 = \frac{\dot{q}}{T_{s5} - T_{sat.}} = 3346.9510$
$T_{s10} =$	71.2580	$h_6 = \frac{\dot{q}}{T_{s6} - T_{sat.}} = 3195.2611$
$T_{s11} =$	70.9075	$h_7 = \frac{\dot{q}}{T_{s7} - T_{sat.}} = 3312.6948$
$T_{s12} =$	70.3597	$h_8 = \frac{\dot{q}}{T_{s8} - T_{sat.}} = 5313.0315$
$\dot{m} = 0.167 \frac{kg}{s}$		$h_9 = \frac{\dot{q}}{T_{s9} - T_{sat.}} = 2901.4644$
$T_{feed} = 60^\circ$		$h_{10} = \frac{\dot{q}}{T_{s10} - T_{sat.}} = 2930.8240$
$T_{sat.} = 65^\circ$		$h_{11} = \frac{\dot{q}}{T_{s11} - T_{sat.}} = 3104.8991$
$Q = 1760 \text{ W}$		$h_{12} = \frac{\dot{q}}{T_{s12} - T_{sat.}} = 3424.5112$
$L = 1.2 \text{ m}$		$h_{tube1} = 3207.0496$
$R_{cond.} = 0.0001316 \Omega$		$h_{tube2} = 3791.9846$
$r_i = 25 \text{ mm}$		$h_{tube3} = 3090.4247$
$r_o = 25.4 \text{ mm}$		$h_{total} = 3363.1530$
$k_{pipe} = 16 \frac{W}{m.k}$		$h_{correlation} = 3790 \frac{W}{m^2.c}$
$k_{film} = 0.655349 \frac{W}{m.k}$		Error%= 11.26%
$\mu = 0.000432893$		$Nu = \frac{h_o d}{k_{film}} = 258.664$
$\nu = 4.415E-7$		$d = 50.8mm$
$C_p = 4185.43 \frac{J}{kg.k}$		

جدول ۵-۶ حالت شار ۲۵ کیلووات بر متر مربع و دبی ۴ لیتر بر دقیقه

ورودی ها	معادلات	نتایج
$T_{s1} =$	76.1217	$\Gamma = \dot{m}/L = 0.0278 \frac{kg}{m.s}$
$T_{s2} =$	75.6998	$Re = 4\Gamma/\mu = 258.6$
$T_{s3} =$	75.6206	$\dot{q} = Q/A = 25144.7916 \frac{W}{m^2}$
$T_{s4} =$	74.2594	$Pr = \nu/\alpha = 2.76463$
$T_{s5} =$	74.7468	$h_1 = \frac{\dot{q}}{T_{s1} - T_{sat.}} = 2262.4974$
$T_{s6} =$	74.6952	$h_2 = \frac{\dot{q}}{T_{s2} - T_{sat.}} = 2352.2882$
$T_{s7} =$	74.4996	$h_3 = \frac{\dot{q}}{T_{s3} - T_{sat.}} = 2369.0424$
$T_{s8} =$	72.4323	$h_4 = \frac{\dot{q}}{T_{s4} - T_{sat.}} = 2718.5732$
$T_{s9} =$	76.4468	$h_5 = \frac{\dot{q}}{T_{s5} - T_{sat.}} = 2581.5230$
$T_{s10} =$	76.3952	$h_6 = \frac{\dot{q}}{T_{s6} - T_{sat.}} = 2595.1873$
$T_{s11} =$	76.1996	$h_7 = \frac{\dot{q}}{T_{s7} - T_{sat.}} = 2648.6577$
$T_{s12} =$	74.1323	$h_8 = \frac{\dot{q}}{T_{s8} - T_{sat.}} = 3387.6521$
$\dot{m} = 0.066 \frac{kg}{s}$		$h_9 = \frac{\dot{q}}{T_{s9} - T_{sat.}} = 2197.7319$
$T_{feed} = 60^\circ$		$h_{10} = \frac{\dot{q}}{T_{s10} - T_{sat.}} = 2207.6372$
$T_{sat.} = 65^\circ$		$h_{11} = \frac{\dot{q}}{T_{s11} - T_{sat.}} = 2246.2061$
$Q = 2413.9 \text{ W}$		$h_{12} = \frac{\dot{q}}{T_{s12} - T_{sat.}} = 2755.8194$
$L = 1.2 \text{ m}$		$h_{tube1} = 2425.6003$
$R_{cond.} = 0.0001316 \Omega$		$h_{tube2} = 2803.2550$
$r_i = 25 \text{ mm}$		$h_{tube3} = 2351.8486$
$r_o = 25.4 \text{ mm}$		$h_{total} = 2526.9013$
$k_{pipe} = 16 \frac{W}{m.k}$		$h_{correlation} = 3151.45 \frac{W}{m^2.c}$
$k_{film} = 0.655349 \frac{W}{m.k}$		Error%= 19.81%
$\mu = 0.000432893$		$Nu = \frac{h_o d}{k_{film}} = 195.89$
$\nu = 4.415E-7$		$d = 50.8mm$
$C_p = 4185.43 \frac{J}{kg.k}$		

جدول ۶-۶ حالت شار ۲۵ کیلووات بر متر مربع و دبی ۶ لیتر بر دقیقه

ورودی ها	معادلات	نتایج
$T_{s1} =$	75.821	$\Gamma = \dot{m}/L = 0.0417 \frac{kg}{m.s}$
$T_{s2} =$	75.399	$Re = 4\Gamma/\mu = 387.9$
$T_{s3} =$	75.320	$\dot{q} = Q/A = 25144.7916 \frac{W}{m^2}$
$T_{s4} =$	73.959	$Pr = \nu/\alpha = 2.76463$
$T_{s5} =$	74.746	$h_1 = \frac{\dot{q}}{T_{s1} - T_{sat.}} = 2325.3111$
$T_{s6} =$	74.695	$h_2 = \frac{\dot{q}}{T_{s2} - T_{sat.}} = 2420.2758$
$T_{s7} =$	74.499	$h_3 = \frac{\dot{q}}{T_{s3} - T_{sat.}} = 2437.9957$
$T_{s8} =$	72.432	$h_4 = \frac{\dot{q}}{T_{s4} - T_{sat.}} = 2809.8065$
$T_{s9} =$	75.836	$h_5 = \frac{\dot{q}}{T_{s5} - T_{sat.}} = 2581.5230$
$T_{s10} =$	75.695	$h_6 = \frac{\dot{q}}{T_{s6} - T_{sat.}} = 2595.1873$
$T_{s11} =$	75.401	$h_7 = \frac{\dot{q}}{T_{s7} - T_{sat.}} = 2648.6577$
$T_{s12} =$	75.094	$h_8 = \frac{\dot{q}}{T_{s8} - T_{sat.}} = 3387.6521$
$\dot{m} = 0.1 \frac{kg}{s}$		$h_9 = \frac{\dot{q}}{T_{s9} - T_{sat.}} = 2321.9323$
$T_{feed} = 60^\circ$		$h_{10} = \frac{\dot{q}}{T_{s10} - T_{sat.}} = 2352.3172$
$T_{sat.} = 65^\circ$		$h_{11} = \frac{\dot{q}}{T_{s11} - T_{sat.}} = 2419.0745$
$Q = 2413.9 \text{ W}$		$h_{12} = \frac{\dot{q}}{T_{s12} - T_{sat.}} = 2499.7220$
$L = 1.2 \text{ m}$		$h_{tube1} = 2498.3473$
$R_{cond.} = 0.0001316 \Omega$		$h_{tube2} = 2803.2550$
$r_i = 25 \text{ mm}$		$h_{tube3} = 2398.2615$
$r_o = 25.4 \text{ mm}$		$h_{total} = 2566.6213$
$k_{pipe} = 16 \frac{W}{m.k}$		$h_{correlation} = 3417.66 \frac{W}{m^2.c}$
$k_{film} = 0.655349 \frac{W}{m.k}$		Error%= 24.9%
$\mu = 0.000432893$		$Nu = \frac{h_o d}{k_{film}} = 197.79$
$\nu = 4.415E-7$		$d = 50.8mm$
$C_p = 4185.43 \frac{J}{kg.k}$		

جدول ۶-۷ حالت شار ۲۵ کیلووات بر متر مربع و دبی ۸ لیتر بر دقیقه

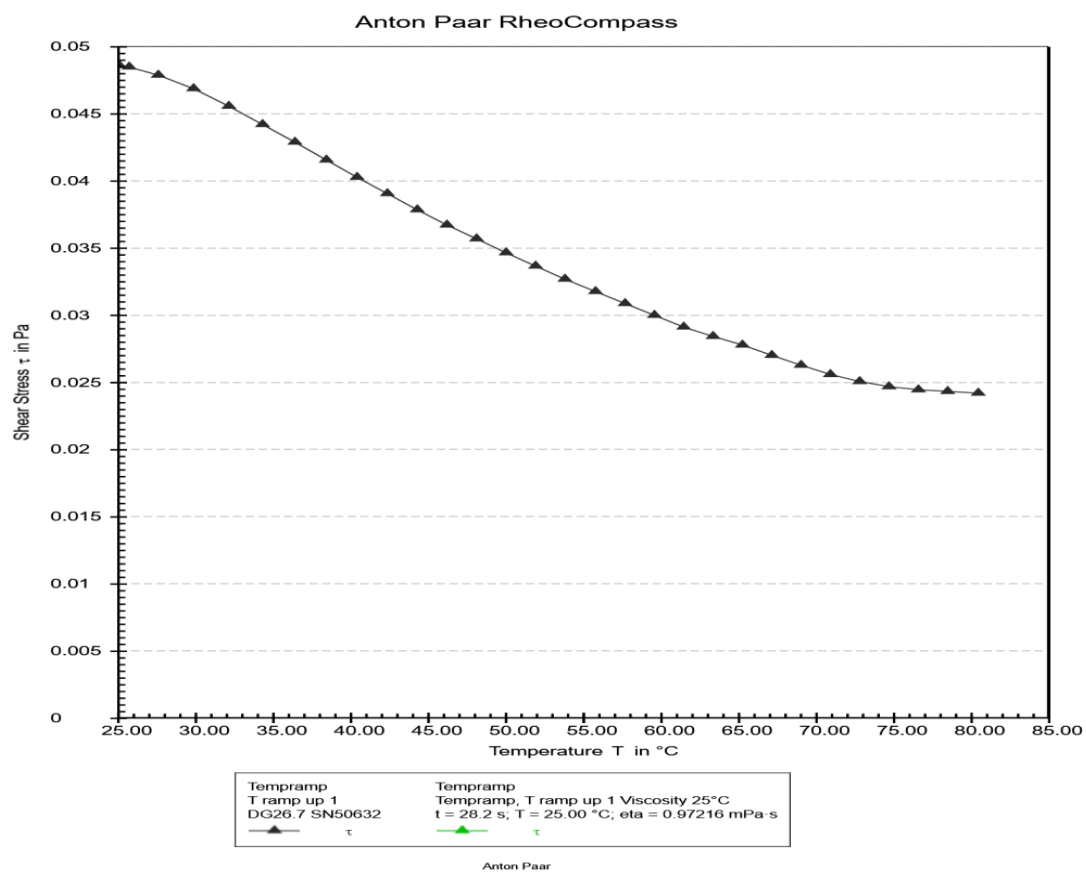
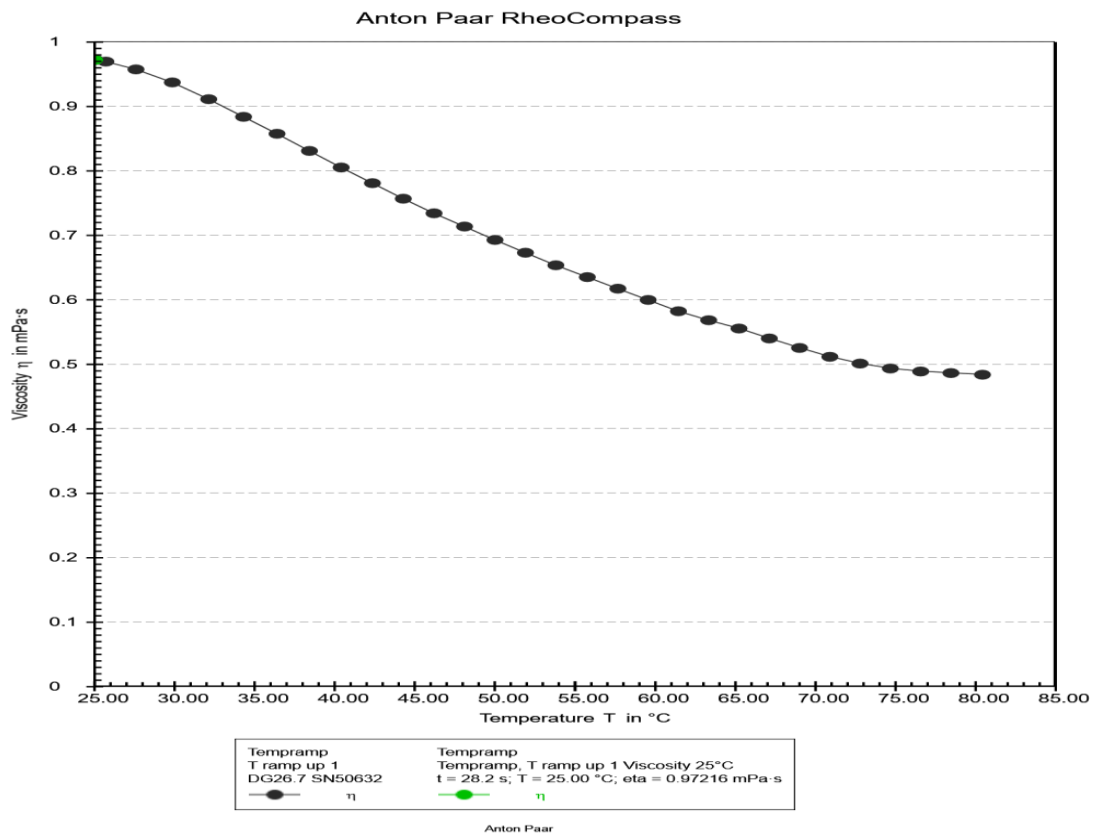
ورودی ها		معادلات	نتایج
$T_{s1} =$	75.121	$\Gamma = \dot{m}/L$	$0.0555 \frac{kg}{m.s}$
$T_{s2} =$	74.699	$Re = 4\Gamma/\mu =$	516.28
$T_{s3} =$	74.620	$\dot{q} = Q/A =$	$25144.7916 \frac{W}{m^2}$
$T_{s4} =$	73.259	$Pr = \nu/\alpha =$	2.76463
$T_{s5} =$	73.646	$h_1 = \frac{\dot{q}}{T_{s1} - T_{sat.}} =$	2486.3915
$T_{s6} =$	73.595	$h_2 = \frac{\dot{q}}{T_{s2} - T_{sat.}} =$	2595.3191
$T_{s7} =$	73.399	$h_3 = \frac{\dot{q}}{T_{s3} - T_{sat.}} =$	2615.6458
$T_{s8} =$	71.332	$h_4 = \frac{\dot{q}}{T_{s4} - T_{sat.}} =$	3048.5516
$T_{s9} =$	74.936	$h_5 = \frac{\dot{q}}{T_{s5} - T_{sat.}} =$	2910.4504
$T_{s10} =$	74.795	$h_6 = \frac{\dot{q}}{T_{s6} - T_{sat.}} =$	2927.8168
$T_{s11} =$	74.501	$h_7 = \frac{\dot{q}}{T_{s7} - T_{sat.}} =$	2996.0621
$T_{s12} =$	74.194	$h_8 = \frac{\dot{q}}{T_{s8} - T_{sat.}} =$	3978.0646
$\dot{m} = 0.133 \frac{kg}{s}$		$h_9 = \frac{\dot{q}}{T_{s9} - T_{sat.}} =$	2532.5494
$T_{feed} = 60^{\circ}$		$h_{10} = \frac{\dot{q}}{T_{s10} - T_{sat.}} =$	2568.7201
$T_{sat.} = 65^{\circ}$		$h_{11} = \frac{\dot{q}}{T_{s11} - T_{sat.}} =$	2648.5589
$Q = 2413.9 \text{ W}$		$h_{12} = \frac{\dot{q}}{T_{s12} - T_{sat.}} =$	2746.3795
$L = 1.2 \text{ m}$		$h_{tube1} =$	2686.4770
$R_{cond.} = 0.0001316 \text{ } \Omega$		$h_{tube2} =$	3203.0985
$r_i = 25 \text{ mm}$		$h_{tube3} =$	2624.0520
$r_o = 25.4 \text{ mm}$		$h_{total} =$	2837.8758
$k_{pipe} = 16 \frac{W}{m.k}$		$h_{correlation} =$	$3618.78 \frac{W}{m^2.c}$
$k_{film} = 0.655349 \frac{W}{m.k}$		Error%=	21.57%
$\mu = 0.000432893$		$Nu = \frac{h_o d}{k_{film}}$	220
$\nu = 4.415E-7$		$d = 50.8mm$	
$C_p = 4185.43 \frac{J}{ka.k}$			

جدول ۸-۶ حالت شار ۲۵ کیلووات بر متر مربع و دبی ۱۰ لیتر بر دقیقه

ورودی ها	معادلات	نتایج
$T_{s1} =$	73.521	$\Gamma = \dot{m}/L = 0.07 \frac{kg}{m.s}$
$T_{s2} =$	73.099	$Re = 4\Gamma/\mu = 651.16$
$T_{s3} =$	73.0206	$\dot{q} = Q/A = 25144.7916 \frac{W}{m^2}$
$T_{s4} =$	71.659	$Pr = \nu/\alpha = 2.76463$
$T_{s5} =$	72.246	$h_1 = \frac{\dot{q}}{T_{s1} - T_{sat.}} = 2954.2558$
$T_{s6} =$	72.195	$h_2 = \frac{\dot{q}}{T_{s2} - T_{sat.}} = 3109.4888$
$T_{s7} =$	71.999	$h_3 = \frac{\dot{q}}{T_{s3} - T_{sat.}} = 3138.4702$
$T_{s8} =$	69.932	$h_4 = \frac{\dot{q}}{T_{s4} - T_{sat.}} = 3783.6680$
$T_{s9} =$	73.636	$h_5 = \frac{\dot{q}}{T_{s5} - T_{sat.}} = 3473.9419$
$T_{s10} =$	73.495	$h_6 = \frac{\dot{q}}{T_{s6} - T_{sat.}} = 3498.6819$
$T_{s11} =$	73.201	$h_7 = \frac{\dot{q}}{T_{s7} - T_{sat.}} = 3596.6078$
$T_{s12} =$	72.894	$h_8 = \frac{\dot{q}}{T_{s8} - T_{sat.}} = 5112.9961$
$\dot{m} = 0.167 \frac{kg}{s}$		$h_9 = \frac{\dot{q}}{T_{s9} - T_{sat.}} = 2914.4725$
$T_{feed} = 60^\circ$		$h_{10} = \frac{\dot{q}}{T_{s10} - T_{sat.}} = 2962.4338$
$T_{sat.} = 65^\circ$		$h_{11} = \frac{\dot{q}}{T_{s11} - T_{sat.}} = 3069.1956$
$Q = 2413.9 \text{ W}$		$h_{12} = \frac{\dot{q}}{T_{s12} - T_{sat.}} = 3203.43408$
$L = 1.2 \text{ m}$		$h_{tube1} = 3246.4707$
$R_{cond.} = 0.0001316 \Omega$		$h_{tube2} = 3920.5569$
$r_i = 25 \text{ mm}$		$h_{tube3} = 3920.5569$
$r_o = 25.4 \text{ mm}$		$h_{total} = 3401.4705$
$k_{pipe} = 16 \frac{W}{m.k}$		$h_{correlation} = 3790 \frac{W}{m^2.c}$
$k_{film} = 0.655349 \frac{W}{m.k}$		Error%= 10.25
$\mu = 0.000432893$		$Nu = \frac{h_o d}{k_{film}} = 263.69$
$\nu = 4.415E-7$		$d = 50.8mm$
$C_p = 4185.43 \frac{J}{kg.k}$		

پوست ب) تست آنالیز آب

پیوست ج) نتایج تست و سکوزیت و تنش برشی



شکل ۶-۲ تغییرات وسکوزیته و تنش برشی آب ورودی به دستگاه در دماهای مختلف

پوستج) سندکالیراسیون سنورہ

مورد تأیید سازمان ملی
استاندارد ایران
شماره تأیید صلاحیت
AL / 2494

کاوش ابزار لیان (کالکو)

خدمات تست، کالیبراسیون، ابزار دقیق و مشاوره فنی



گواهی کالیبراسیون

CERTIFICATE OF CALIBRATION

Certificate No.

99.982.2.1

شماره گواهینامه

Page No. 1 of 1

Customer specifications

Applicant's name: دانشگاه صنعتی شاهرود (وامد دانشکده مکانیک - آزمایشگاه انتقال حرارت)
Address: استان سمنان، شهرستان شاهرود، میدان هفت تیر
Request date: 1399.10.17
Calibration date: 1399.10.20
Date of issuance: 1399.10.24
Re-cal date: Suggested: 1400.10.20
Requested:

شماره صفحه 1 از 1

مشخصات متقاضی

نام متقاضی: دانشگاه صنعتی شاهرود
آدرس: استان سمنان، شهرستان شاهرود، میدان هفت تیر
تاریخ درخواست: 1399.10.17
تاریخ کالیبراسیون: 1399.10.20
تاریخ صدور گواهی: 1399.10.24
تاریخ کالیبراسیون مجدد: پیشنهادی: 1400.10.20
درخواستی:

Equipment specifications

Equipment name: ترموکوپل
Manufacturer: ...
Model: ...
Serial No.: ...
Code: DSH-TC-01
Range of equipment: ... °C
Required point/range: 0 to 120 °C
Resolution: 0.1 °C
Location: ...

مشخصات تجهیز

نام تجهیز: ترموکوپل
سازنده: ...
مدل: ...
شماره سریال: ...
کد: DSH-TC-01
گستره تجهیز: ... °C
گستره درخواستی: 0 to 120 °C
تفکیک پذیری: 0.1 °C
محل استقرار: ...

Calibration report

Environmental conditions: 23±2°C 45±10%RH
Reference standard: IDS 327

Reference equipment

Equipment	Manufacturer	Model	Serial No.	Certificate No.	Re-cal date
Reference multi calibrator	Fluke	725	1168566	97.7.1.12	99.12.07
Reference PRT	Isotech	RTD	31395/31	T-MYZCKQ	00.07.02
Reference furnace	Isotech	Fastcal low	301684/4	97.7.1.14	99.12.07

Traceability

The above equipment are traceable to PANHA
Mean while calculated uncertainty is according to EA 4-02 standard.

گزارش کالیبراسیون

شرایط محیطی

استاندارد مرجع

تجهیزات مرجع

Equipment	Manufacturer	Model	Serial No.	Certificate No.	Re-cal date
Reference multi calibrator	Fluke	725	1168566	97.7.1.12	99.12.07
Reference PRT	Isotech	RTD	31395/31	T-MYZCKQ	00.07.02
Reference furnace	Isotech	Fastcal low	301684/4	97.7.1.14	99.12.07

قابلیت ردیابی

Calibration results

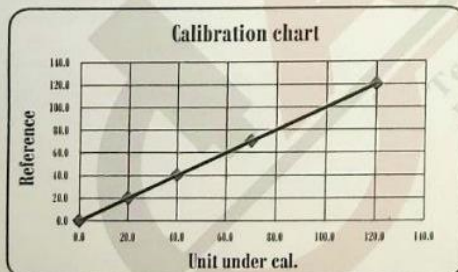


Table unit °C	Unit under cal. value	Reference value	Error value	Expanded uncertainty
	0.0	0.0	0.0	± 0.8
	19.9	20.0	-0.1	
	39.9	40.0	-0.1	
	69.9	70.0	-0.1	
	119.9	120.0	-0.1	

This certificate is invalid unless signed & sealed by lab.
This certificate shall not be published or reproduced other than in full.
The user must act in order to recalibrate during a specified period of time.
Uncertainty of measurements estimated regarding k=2 and confidence level of approximately 95%.

کالیبره کننده
A2



مدیر آزمایشگاه

Laboratory Manager

No. 1, Aboozar Alley, Istgah-e-Avval st., After Fire Station,
Between Standard sq. and Mesbah Crossroad, Karaj, Alborz-Iran
Tel/Fax: +98 26 34940476 - 34940541- 34940788
+98 26 34941027 - 34941391- 32800401
Mobile: +98 912 1856894
www.calculab.ir

البرز، کرج، میدان استخرخارد به سمت چهارراه مصباح، بعد از آشنشانی
انتهای کوچه ایستگاه اول، ابتدای کوچه ابوذر، پلاک 1
تلفکس: ۰۲۶ - ۳۴۹۴۰۴۷۶ - ۳۴۹۴۰۵۴۱ - ۳۴۹۴۰۷۸۸
۰۲۶ - ۳۴۹۴۱۰۲۷ - ۳۴۹۴۱۳۹۱ - ۳۲۸۰۰۴۰۱
همراه: ۰۹۱۲ - ۱۸۵۶۸۹۴
info@calculab.ir

شکل ۳-۶ گواهی کالیبراسیون سنسور نوع K

گواهی کالیبراسیون

CERTIFICATE OF CALIBRATION

Certificate No.

99.100.284.1.2

شماره گواهینامه

Page No. 1 of 1

شماره صفحه ۱ از ۱

Customer specifications

مشخصات متقاضی

Applicant's name:	آقای مهندس عابدینی	نام متقاضی:
Address:	...	آدرس:
Request date:	1399.09.25	تاریخ درخواست:
Calibration date:	1399.09.26	تاریخ کالیبراسیون:
Date of issuance:	1399.09.26	تاریخ صدور گواهی:
Re-cal date:	1400.09.26	تاریخ کالیبراسیون مجدد:
Suggested:	...	پیشنهادی:
Requested:	...	درخواستی:

Equipment specifications

مشخصات تجهیز

Equipment name:	سنسور دما مقاومتی	نام تجهیز:
Manufacturer:	...	سازنده:
Model:	RTD / PT100 / 3 W	مدل:
Serial No.:	...	شماره سریال:
Code:	RT - DS - 02	کد:
Range of equipment:	0 to 120 °C	گستره تجهیز:
Required point range:	0 to 120 °C	گستره درخواستی:
Resolution:	...	تکمیل پذیری:
Location:	...	محل استقرار:

Calibration report

گزارش کالیبراسیون

Environmental conditions	23±2°C		45±10%RH		شرایط محیطی
Reference standard	IDS 334				استاندارد مرجع
Reference equipment					تجهیزات مرجع
Equipment	Manufacturer	Model	Serial No.	Certificate No.	Re-cal date
Reference multi calibrator	Fluke	725	1901172	99.7.1.12	00.03.07
Reference thermocouple	Isotech	Type S	301760/6	T-MYZCR	00.07.01
Reference PRT	Isotech	RTD	31395/31	9909748001	02.03.25
Reference furnace	Isotech	Fastcal low	301684/4	97.7.1.14	99.12.07
Reference furnace	Isotech	Fastcal high	301684/8	97.7.1.13	99.12.07
Reference furnace	Isotech	Pegasus	301760.12	97.7.1.15	99.12.07

Traceability

The above equipment are traceable to PANHA & SGK.

Mean while calculated uncertainty is according to EA 1-02 standard.

قابلیت ردیابی

Calibration results

نتایج کالیبراسیون

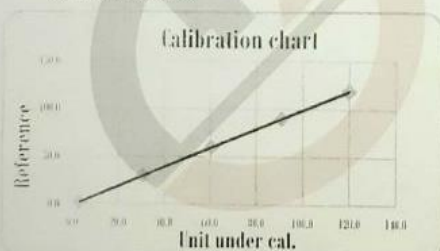


Table unit °C	unit under cal. value	Reference value	Error value	Expanded uncertainty
	3.1	2.0	1.1	± 1.3
	30.6	29.3	0.3	
	60.5	59.9	0.6	
	90.9	90.3	0.6	
	119.9	119.5	0.4	

This certificate is invalid unless signed & sealed by lab.

This certificate shall not be published or reproduced other than as full.

The user must act in order to recalibrate during a specified period of time.

Accuracy of measurement (estimate) regarding k=2 and considering typical approximation 5%.

این گواهی بدون مهر و امضا معتبر نیست و فاقد اعتبار است.

مکتوبه تهیه برداری از این گواهی باید به صورت کامل و از تمامی صفحات باشد.

استفاده کننده در فاصله زمانی معین نسبت به کالیبراسیون مجدد اقدام نماید.

درم فاصله تقریبی ۵ درصد از سطح اطمینان ۹۵٪ و ضریب پوشش ۲ در نظر گرفته شود.

A2

کالیبره کننده
Calibrating by

مهر آزمایشگاه
Laboratory seal

مهر آزمایشگاه
Laboratory signature

No. 1, Aboozar Alley, Istgah-e-Avval st., After Fire Station,
Between Standard sq. and Mesbah Crossroad, Karaj, Alborz-Iran
Tel/Fax: +98 26 34940476 - 34940541- 34940788
+98 26 34941027 - 34941391- 32800401
Mobile: +98 912 1856894
www.calculab.ir

البرز، کرج، میدان استاندارد به سمت چهارراه مصباح، بعد از آتشنشانی
انتهای کوچه ایستگاه اول، ابتدای کوچه ابوذر پلک ۱
تلفکس: +98 26 34940476 - 34940541 - 34940788
+98 26 34941027 - 34941391 - 32800401
همراه: +98 912 1856894
info@calculab.ir

پوست د) تحلیل عدم قطعیت و روش فاصله اطمینان

۶-۱ تعاریف

خطا^۱: تفاضل بین مقدار اندازه گیری شده و مقدار واقعی یک کمیت

عدم قطعیت^۲: عدم قطعیت یعنی تخمین احتمالی خطا (از آنجایی که که همواره مقدار دقیق خطا را

نداریم خطا را با عدم قطعیت گزارش می دهیم)

دقت^۳: درجه نزدیکی مقدار محاسبه شده از کمیت، به مقدار واقعی

صحت^۴: درجه نزدیکی داده ها در تکرارهای متوالی با شرایط یکسان

انواع خطاهای تجربی و منابع آنها

۱- خطای تصادفی: نوسانات غیر قابل تشخیص در شرایط محیطی (مانند دما)، عدم تنظیم

اتصالات،

خطای خواندن اعداد، تغییرات کوچک در موقعیت دستگاه اندازه گیری

۲- خطای سیستماتیک: به اندازه گیری فاقد خطای سیستماتیک، اندازه گیری معتبر گفته می شود.

از جمله عواملی که سبب بروز خطای سیستماتیک می شود می توان به کالیبره نبودن دستگاه

اندازه گیری اشاره کرد.

۶-۲ عدم قطعیت

عدم قطعیت یعنی تخمین احتمالی خطا (از آنجایی که همواره مقدار دقیق خطا را نداریم، خطا را با

عدم قطعیت گزارش می دهیم) عدم قطعیت یعنی تا چه حد اندازه گیری انجام شده نشان دهنده

مقدار واقعی مورد اندازه گیری شده است.

¹ Error

² Uncertainty

³ Accuracy

⁴ Precision

۶-۲-۱ اندازه گیری عدم قطعیت

میانگین حسابی یا متوسط^۱، نوعی سنجش گرایش به مرکز است و عبارت است از مجموع مقادیر موجود در مجموعه داده‌ها تقسیم بر تعداد آن‌ها. برای محاسبه میانگین حسابی از رابطه (۶-۱) استفاده می‌شود.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad ۱-۶$$

در آمار، انحراف معیار^۲ یکی از شاخص‌های پراکندگی است که نشان می‌دهد به‌طور میانگین داده‌ها چه مقدار از مقدار متوسط فاصله دارند. اگر انحراف معیار مجموعه‌ای از داده‌ها نزدیک به صفر باشد، نشانه آن است که داده‌ها نزدیک به میانگین هستند و پراکندگی اندکی دارند، در حالیکه انحراف معیار بزرگ، بیانگر پراکندگی قابل توجه داده‌ها است. انحراف معیار برابر با ریشه دوم واریانس است. محاسبه انحراف معیار از رابطه (۶-۲) قابل انجام است.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad ۲-۶$$

در نهایت اندازه‌گیری عدم قطعیت برای کمیت x_i ، در n بار تکرار آزمایش از معادله (۱) محاسبه می‌شود [۵۵].

$$\sigma_E = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad ۳-۶$$

¹ Arithmetic mean

² Standard deviation

عدم قطعیت متغیر x از رابطه (۴-۶) محاسبه می‌گردد.

$$\sigma_x = \frac{a}{l} \quad ۴-۶$$

که در آن a دقت و l طول بازه تغییرات وسیله اندازه‌گیری x متغیر است.

اگر $x, y, z, \dots$ متغیرها و $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \dots$ عدم قطعیت هر متغیر باشد عدم قطعیت تابع از $f = f(x, y, z, \dots)$ رابطه (۵-۶) محاسبه می‌گردد [۵۶، ۵۷].

$$\sigma_f^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \sigma_z^2 \quad ۵-۶$$

تابع	مشتقات	واریانس	انحراف معیار
$f = kx; k \in R$	$\frac{\partial f}{\partial x} = k$	$\sigma_f^2 = k^2 \sigma_x^2$	$\sigma_f = k \sigma_x$
$f = x + y$	$\frac{\partial f}{\partial x} = 1, \frac{\partial f}{\partial y} = 1$	$\sigma_f^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2$	$\sigma_f = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$
$f = x - y$	$\frac{\partial f}{\partial x} = 1, \frac{\partial f}{\partial y} = -1$	$\sigma_f^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2$	$\sigma_f = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$
$f = xy$	$\frac{\partial f}{\partial x} = y, \frac{\partial f}{\partial y} = x$	$\left(\frac{\sigma_f}{f}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{y}\right)^2$	$\sigma_f = f \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{y}\right)^2}$
$f = x/y$	$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{1}{y}, \frac{\partial f}{\partial y} = \frac{-x}{y^2}$	$\left(\frac{\sigma_f}{f}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{y}\right)^2$	$\sigma_f = f \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{y}\right)^2}$

جدول ۱-۶ عدم قطعیت چندتابع پرکاربرد

۳-۶ روش فاصله اطمینان

روش آماری که در این مورد استفاده قرار گرفته، روشی است که در آن بتوان حدود اطمینان را در اطراف یک داده مشخص، نمایش داد. در هر آزمایش این فاصله اطمینان^۱ حدودی است که به احتمال زیاد واقعیت در آن وجود دارد. هر چقدر تعداد داده هایی که به دست می آوریم کمتر باشد این بازه وسیع تر بوده و به همان میزان نیز احتمال رسیدن به واقعیت کمتر است. در واقع وقتی تعداد داده ها زیاد باشد با اطمینان بیشتری بیان خواهیم کرد عددی که به دست آورده ایم به واقعیت نزدیک است و فاصله اطمینان نیز کوچک تر خواهد بود. به منظور دست یافتن به فاصله اطمینان در مرحله اول باید مشخص کرد منظور از فاصله اطمینان چیست؟ یعنی در واقع چه حدی از فاصله اطمینان قابل قبول است؟ برای

$$\mu = \bar{x} \pm (B \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}}) \quad ۶-۶$$

این منظور فاصله اطمینان در نظر گرفته شده در اکثر مطالعات، برابر با ۹۰ درصد، ۹۵ درصد و ۹۹ درصد است که به این معنی است که در صورتی که مطالعه مورد نظر ۱۰۰ بار تکرار شود در ۹۰، ۹۵ و ۹۹ بار همین محدوده به دست خواهد آمد. هرچه عدد مربوط به فاصله اطمینان از ۱۰۰ فاصله می گیرد میزان دقت آن کاهش می یابد، به این معنی، احتمال اینکه شاخصی که با بازه اطمینان ۹۹٪ بیان شده به واقعیت نزدیک تر باشد، بیشتر از شاخصی است که با بازه اطمینان ۹۵٪ بیان می شود. با توجه به معرفی پارامترهای آماری که در بالا گفته شد، فاصله اطمینان و حد بالا و پایین این فاصله، به صورت رابطه زیر نمایش داده می شود.

که در آن B ضریب تعمیم است. این پارامتر از جدول ۶-۲ انتخاب می شود. در این جدول ستون عمودی بیانگر تعداد تکرار آزمایش و ستون افقی، میزان دقت محاسبات را نشان می دهد.

¹ Confidence interval

t Table

cum. prob	$t_{.50}$	$t_{.75}$	$t_{.80}$	$t_{.85}$	$t_{.90}$	$t_{.95}$	$t_{.975}$	$t_{.99}$	$t_{.995}$	$t_{.999}$	$t_{.9995}$
one-tail	0.50	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05	0.025	0.01	0.005	0.001	0.0005
two-tails	1.00	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01	0.002	0.001
df											
1	0.000	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.71	31.82	63.66	318.31	636.62
2	0.000	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	22.327	31.599
3	0.000	0.765	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	10.215	12.924
4	0.000	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173	8.610
5	0.000	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5.893	6.869
6	0.000	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208	5.959
7	0.000	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.785	5.408
8	0.000	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	4.501	5.041
9	0.000	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.297	4.781
10	0.000	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.144	4.587
11	0.000	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.025	4.437
12	0.000	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.930	4.318
13	0.000	0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.852	4.221
14	0.000	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.787	4.140
15	0.000	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.733	4.073
16	0.000	0.690	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.686	4.015
17	0.000	0.689	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.646	3.965
18	0.000	0.688	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.610	3.922
19	0.000	0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.579	3.883
20	0.000	0.687	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.552	3.850
21	0.000	0.686	0.859	1.063	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.527	3.819
22	0.000	0.686	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.505	3.792
23	0.000	0.685	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.485	3.768
24	0.000	0.685	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.467	3.745
25	0.000	0.684	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.450	3.725
26	0.000	0.684	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.435	3.707
27	0.000	0.684	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.421	3.690
28	0.000	0.683	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.408	3.674
29	0.000	0.683	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.396	3.659
30	0.000	0.683	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.385	3.646
40	0.000	0.681	0.851	1.050	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.307	3.551
60	0.000	0.679	0.848	1.045	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.232	3.460
80	0.000	0.678	0.846	1.043	1.292	1.664	1.990	2.374	2.639	3.195	3.416
100	0.000	0.677	0.845	1.042	1.290	1.660	1.984	2.364	2.626	3.174	3.390
1000	0.000	0.675	0.842	1.037	1.282	1.646	1.962	2.330	2.581	3.098	3.300
Z	0.000	0.674	0.842	1.036	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.090	3.291
	0%	50%	60%	70%	80%	90%	95%	98%	99%	99.8%	99.9%
	Confidence Level										

جدول ۲-۶ جدول تعیین ضریب تعمیم

فصل ۷ مراجع

- [1] A. Cipollina, G. Micale, and L. Rizzuti, "Seawater desalination," *Conv. Renew. energy Process. Berlin Heidelb. Springer-Verlag*, p. 307, 2009.
- [2] H. T. El-Dessouky and H. M. Ettouney, *Fundamentals of salt water desalination*. Elsevier, 2002.
- [3] م. ک. ش. د. و. ه. پ. شهری, کتاب آب شیرین کن های خورشیدی. ۱۳۹۰.
- [4] M. Al-Shammiri and M. Safar, "Multi-effect distillation plants: state of the art," *Desalination*, vol. 126, no. 1–3, pp. 45–59, 1999.
- [5] A. M. El-Nashar, "The economic feasibility of small MED seawater desalination plants for remote arid areas," *Desalination*, vol. 134, no. 1–3, pp. 173–186, 2001.
- [6] H. Rahman, M. N. A. Hawlader, and A. Malek, "An experiment with a single-effect submerged vertical tube evaporator in multi-effect desalination," *Desalination*, vol. 156, no. 1–3, pp. 91–100, 2003.
- [7] F. Kafi, V. Renaudin, D. Alonso, and J. M. Hornut, "New MED plate desalination process: Thermal performances," *Desalination*, vol. 166, no. 1–3, pp. 53–62, 2004.
- [8] A. Ophir and F. Lokiec, "Advanced MED process for most economical sea water desalination," *Desalination*, vol. 182, no. 1–3, pp. 187–198, 2005.
- [9] I. S. Park, S. M. Park, and J. S. Ha, "Design and application of thermal vapor compressor for multi-effect desalination plant," *Desalination*, vol. 182, no. 1–3, pp. 199–208, 2005.
- [10] Y. Wang and N. Lior, "Performance analysis of combined humidified gas turbine power generation and multi-effect thermal vapor compression desalination systems. Part 2: The evaporative gas turbine based system and some discussions," *Desalination*, vol. 207, no. 1–3, pp. 243–256, 2007.
- [11] P. V. Sen, P. K. Sen, S. K. Vyas, and A. Mudgal, "Icme07-Am-57 a Small-Scale Multiple Effect Water Distillation System (Mewd) for Rural Sector," vol. 2007, no. December, pp. 29–31, 2007.
- [12] C. Ziqian, Z. Hongfei, H. Kaiyan, and M. Chaochen, "Steady-state experimental studies on a multi-effect thermal regeneration solar desalination unit with horizontal tube falling film evaporation," vol. 207, pp. 59–70, 2007.
- [13] R. K. Kamali and S. Mohebinia, "Experience of design and optimization of multi-effects desalination systems in Iran," *Desalination*, vol. 222, no. 1–3, pp. 639–645, 2008.

- [14] R. K. Kamali, A. Abbassi, S. A. S. Vanini, and M. S. Avval, "Thermodynamic design and parametric study of MED-TVC," vol. 222, pp. 596–604, 2008.
- [15] H. Sayyaadi and A. Saffari, "Thermoeconomic optimization of multi effect distillation desalination systems," *Appl. Energy*, vol. 87, no. 4, pp. 1122–1133, 2010.
- [16] F. Mahbub, M. N. A. Hawlader, and A. S. Mujumdar, "Combined water and power plant (CWPP) — a novel desalination technology," *Desalin. Water Treat.*, vol. 5, no. 1–3, pp. 172–177, 2009.
- [17] R. K. Kamali, A. Abbassi, and S. A. Sadough Vanini, "A simulation model and parametric study of MED-TVC process," *Desalination*, vol. 235, no. 1–3, pp. 340–351, 2009.
- [18] M. A. Sharaf, A. S. Nafey, and L. García-Rodríguez, "Exergy and thermo-economic analyses of a combined solar organic cycle with multi effect distillation (MED) desalination process," *Desalination*, vol. 272, no. 1–3, pp. 135–147, 2011.
- [19] S. E. Shakib, M. Amidpour, and C. Aghanaja, "Simulation and optimization of multi effect desalination coupled to a gas turbine plant with HRSG consideration," vol. m, pp. 366–376, 2012.
- [20] D. Zhao, J. Xue, S. Li, H. Sun, and Q. dong Zhang, "Theoretical analyses of thermal and economical aspects of multi-effect distillation desalination dealing with high-salinity wastewater," *Desalination*, vol. 273, no. 2–3, pp. 292–298, 2011.
- [21] P. K. Sen, P. V. Sen, A. Mudgal, S. N. Singh, S. K. Vyas, and P. Davies, "A small scale Multi-effect Distillation (MED) unit for rural micro enterprises: Part I-design and fabrication," *Desalination*, vol. 279, no. 1–3, pp. 15–26, 2011.
- [22] V. G. Gude, N. Nirmalakhandan, S. Deng, and A. Maganti, "Feasibility study of a new two-stage low temperature desalination process," *Energy Convers. Manag.*, vol. 56, pp. 192–198, 2012.
- [23] G. M. Zak, A. Ghobeity, M. H. Sharqawy, and A. Mitsos, "A review of hybrid desalination systems for co-production of power and water: Analyses, methods, and considerations," *Desalin. Water Treat.*, vol. 51, no. 28–30, pp. 5381–5401, 2013.
- [24] L. Wu, Y. Hu, and C. Gao, "Optimum design of cogeneration for power and desalination to satisfy the demand of water and power," *Desalination*, vol. 324, no. 06, pp. 111–117, 2013.

- [25] M. C. Georgiou, A. M. Bonanos, and J. G. Georgiadis, "Evaluation of a Multiple-Effect Distillation Unit under Partial Load Operating Conditions," *Conf. Pap. Energy*, vol. 2013, pp. 1–9, 2013.
- [26] Y. Zheng *et al.*, "Experimental study of falling film evaporation heat transfer on superhydrophilic horizontal-tubes at low spray density," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 111, pp. 1548–1556, 2017.
- [27] I. S. Al-Mutaz and I. Wazeer, "Current status and future directions of MED-TVC desalination technology," *Desalin. Water Treat.*, vol. 55, no. 1, pp. 1–9, 2015.
- [28] K. C. Ng, K. Thu, S. J. Oh, L. Ang, M. W. Shahzad, and A. Bin Ismail, "Recent developments in thermally-driven seawater desalination: Energy efficiency improvement by hybridization of the MED and AD cycles," *Desalination*, vol. 356, pp. 255–270, 2015.
- [29] K. M. Bataineh, "Multi-effect desalination plant combined with thermal compressor driven by steam generated by solar energy," *DES*, vol. 385, pp. 39–52, 2016.
- [30] L. Cioccolanti, A. Savoretti, M. Renzi, F. Caresana, and G. Comodi, "Comparison of different operation modes of a single effect thermal desalination plant using waste heat from m-CHP units," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 100, pp. 646–657, 2016.
- [31] F. Zhang *et al.*, "A low-temperature multi-effect desalination system powered by the cooling water of a diesel engine," *DES*, vol. 404, pp. 112–120, 2017.
- [32] C. Qi, X. Wang, H. Feng, and Q. Lv, "Performance analysis of low-temperature multi-effect distillation system under different feeding modes," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 112, pp. 1452–1459, 2017.
- [33] A. Chorak, P. Palenzuela, and B. Abdellah, "Experimental characterization of a multi-effect distillation system coupled to a flat plate solar collector field: empirical correlations," *Appl. Therm. Eng.*, 2017.
- [34] M. Salimi and M. Amidpour, "Modeling , simulation , parametric study and economic assessment of reciprocating internal combustion engine integrated with multi-effect desalination unit Rate of Return," *Energy Convers. Manag.*, vol. 138, pp. 299–311, 2017.
- [35] G. Filippini, M. A. Al-Obaidi, F. Manenti, and I. M. Mujtaba, "Performance analysis of hybrid system of multi effect distillation and reverse osmosis for seawater desalination via modelling and simulation," *Desalination*, vol. 448, pp. 21–

- 35, Dec. 2018.
- [36] M. L. Elsayed, O. Mesalhy, R. H. Mohammed, and L. C. Chow, "Transient performance of MED processes with different feed configurations," *Desalination*, vol. 438, no. December 2017, pp. 37–53, 2018.
- [37] م. سعادت‌مند and م. محمودی, "مدلسازی و بهینه سازی آب شیرین کن چند مرحله ای in MED," *دهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران*, ۱۳۸۴.
- [38] آ. عطایی and ب. حیدری, "توسعه مدل بهینه یک سامانه آب شیرین کن خورشیدی بر پایه تبخیر چند مرحله ای in (SOLAR-MED)," *نخستین همایش ملی انرژی باد و خورشید*, ۱۳۹۰.
- [39] ا. پاکیزه, "طراحی و مدلسازی ریاضی سیستم آب شیرین کن چند مرحله ای با قابلیت کاربرد در نیروگاه بخار و صنایع مشابه," vol. 41, 1392.
- [40] W. X. Jin, S. C. Low, and T. Quek, "Preliminary experimental study of falling film heat transfer on a vertical doubly fluted plate," *Desalination*, vol. 152, no. 1–3, pp. 201–206, 2003.
- [41] J. Uche, J. Artal, and L. Serra, "Il Desalination Units," vol. 152, pp. 195–200, 2002.
- [42] H. Y. Kim and B. H. Kang, "Effects of hydrophilic surface treatment on evaporation heat transfer at the outside wall of horizontal tubes," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 23, no. 4, pp. 449–458, 2003.
- [43] L. Yang and S. Shen, "Experimental study of falling film evaporation heat transfer outside horizontal tubes," *Desalination*, vol. 220, no. 1–3, pp. 654–660, 2008.
- [44] W. Li, X. Y. Wu, Z. Luo, S. C. Yao, and J. L. Xu, "Heat transfer characteristics of falling film evaporation on horizontal tube arrays," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 54, no. 9–10, pp. 1986–1993, 2011.
- [45] S. Lee, B. Köroğlu, and C. Park, "Experimental investigation of capillary-assisted solution wetting and heat transfer using a micro-scale, porous-layer coating on horizontal-tube, falling-film heat exchanger," *Int. J. Refrig.*, vol. 35, no. 4, pp. 1176–1187, 2012.
- [46] J. G. Bustamante and S. Garimella, "Dominant Flow Mechanisms in Falling-Film and Droplet Mode Evaporation over Horizontal Rectangular Tube Banks Sustainable Thermal Systems Laboratory George W. Woodruff School of Mechanical Engineering Georgia Institute of Technology Atlanta, GA 30332 Sus,"

- vol. 1888, no. 1987, pp. 1–10, 2012.
- [47] R. Abraham and A. Mani, “Experimental studies on thermal spray-coated horizontal tubes for falling film evaporation in multi-effect desalination system,” *Desalin. Water Treat.*, vol. 56, no. 1, pp. 71–82, 2015.
 - [48] C. hua Qi, X. Han, H. qing Lv, Y. lei Xing, and K. xin Han, “Experimental study of heat transfer and scale formation of spiral grooved tube in the falling film distilled desalination,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 119, pp. 654–664, 2018.
 - [49] H. Ding, P. Xie, D. Ingham, L. Ma, and M. Pourkashanian, “Flow behaviour of drop and jet modes of a laminar falling film on horizontal tubes,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 124, no. September, pp. 929–942, 2018.
 - [50] W. M. Yan, C. W. Pan, T. F. Yang, and M. Ghalambaz, “Experimental study on fluid flow and heat transfer characteristics of falling film over tube bundle,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 130, pp. 9–24, 2019.
 - [51] S. M. Ghiaasiaan, *Two-Phase Flow, Boiling and Condensation*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
 - [52] S. Nukiyama, “The maximum and minimum values of the heat Q transmitted from metal to boiling water under atmospheric pressure,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 9, no. 12, pp. 1419–1433, Dec. 1966.
 - [53] W. H. Parken, L. S. Fletcher, V. Sernas, and J. C. Han, “Heat Transfer Through Falling Film Evaporation and Boiling on Horizontal Tubes,” *J. Heat Transfer*, vol. 112, no. 3, pp. 744–750, Aug. 1990.

Abstract

In many cases, the supply of drinking water in a high volume is faced with a lot of problems. Therefore, it is very necessary to build a small or medium scale desalination plant in the range of one to one hundred cubic meters per day. One of the best methods for small-scale water desalination is the use of multi-effect distillation.

In this method, water evaporates in the evaporator in the vacuum chamber at a temperature below its boiling point, and in the condenser the steam from evaporation is converted into fresh water.

Since these devices have been designed and built for large scale (more than 1000 cubic meters per day) so far, we face a lack of information for optimal design on a small scale (1 to 100 cubic meters per day) and also the most important point is heat transfer coefficient estimation. Therefore, to design a MED system, it is necessary to know the heat transfer coefficient (falling film) in different working conditions.

Therefore, for small-scale MED design (which is the focus of the present study) requires a detailed experimental study on falling film converters with the possibility of changing sensitive parameters.

Keywords: water , desalination, multi-effect distillation method, falling film, heat transfer coefficient, Nusselt number



Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Energy Conversion Engineering

Experimental investigations of two-phase heat transfer in a vacuum tank in order to achieve an improved system for desalination

By

Mohammad Taghi Abedian

Supervisor:

Dr. Mohsen Nazari

Dr. Mohammad Mohsen Shahmardan

March 2021